Agosto 1990
Numero 264
Anno XXIII
Volume XLV

Plutone

Le occultazioni reciproche del pianeta più lontano dal Sole e del suo satellite Caronte, che insieme formano un sistema doppio, hanno permesso finalmente di determinarne caratteristiche e composizione

di Richard P. Binzel

Il 18 febbraio di quest'anno ha segnato il sessantesimo anniversario della scoperta di Plutone, ma in tutti questi anni il nono pianeta del sistema solare ha conservato bene i propri segreti. Questo mondo gelido, talmente piccolo e lontano da apparire come una macchiolina priva di qualsiasi segno caratteristico anche quando lo si osserva con i più potenti telescopi installati a terra, è tra l'altro l'unico pianeta non ancora osservato da vicino da una sonda spaziale scientifica.

Nonostante queste difficoltà, negli ultimi 10 anni ha cominciato a prendere forma una nuova immagine di Plutone: specifiche campagne di osservazione condotte con un gran numero di strumenti avanzati e agevolate da alcuni allineamenti celesti particolarmente favorevoli ci hanno dato un certo numero di sorprese. Plutone possiede un satellite, Caronte, talmente grande da poter considerare la coppia di oggetti celesti come un vero e proprio pianeta doppio. Inoltre il pianeta presenta calotte polari brillanti e una regione equatoriale più scura e maculata. La superficie è coperta in gran parte da uno strato di ghiaccio di metano, e si riscontra persino una sottile atmosfera che probabilmente, quando Plutone si trova alla massima distanza dal Sole, condensa in tutto o in parte precipitando al suolo in forma di neve. La superficie di Caronte invece, molto diversa nell'aspetto da quella di Plutone, potrebbe essere una vasta distesa di ghiaccio d'acqua.

Il diametro e la densità di Plutone sono molto simili a quelli di Tritone, il grande satellite di Nettuno visitato di recente dalla sonda *Voyager 2*. Queste e altre somiglianze inducono a ritenere che entrambi i corpi possano essere planetesimi sopravvissuti fino a oggi, residui del sistema solare primordiale sfuggiti alla cattura gravitazionale dei pianeti esterni giganti. Secondo questa ipotesi Tritone sarebbe rimasto «preso» nell'orbita di Nettuno, mentre Plutone sarebbe riuscito a sopravvivere come pianeta a sé stante, su un'orbita indipendente intorno al Sole.

Il primo a scorgere Plutone nel 1930 fu Clyde W. Tombaugh, che stava conducendo una ricognizione fotografica sistematica promossa da Percival Lowell, un facoltoso bostoniano spinto da un appassionato interesse per l'individuazione di un eventuale pianeta transnettuniano. Fin dall'inizio risultò evidente che Plutone è anomalo sotto molti aspetti. Gli altri pianeti esterni percorrono intorno al Sole una traiettoria approssimativamente circolare, ma l'orbita di Plutone è fortemente ellittica: all'afelio la sua distanza dal Sole è pari a 30-50 volte quella della Terra mentre al perielio esso viene a trovarsi più vicino al Sole di quanto non sia Nettuno. Dal 1979 Plutone si trova proprio in quest'ultima situazione e non tornerà a essere il pianeta più lontano dal Sole prima del 1999. Inoltre l'orbita di Plutone è inclinata di ben 17 gradi rispetto al piano di quella terrestre, contrariamente a ciò che accade per tutti gli altri pianeti.

A prescindere dall'orbita, furono ben poche le caratteristiche di Plutone che poterono essere determinate con un'approssimazione appena accettabile nei 50 anni successivi alla sua scoperta. Lowell e altri erano giunti a ipotizzare l'esistenza di un nono pianeta sulla base delle perturbazioni gravitazionali riconosciute nei moti di Urano e Nettuno, e avevano supposto che questo pianeta dovesse possedere una massa circa 10 volte superiore a quella della Terra. Plutone si rivelò molto meno luminoso del previsto, una circostanza che comporta anche dimensioni più piccole di quanto si fosse pensato.

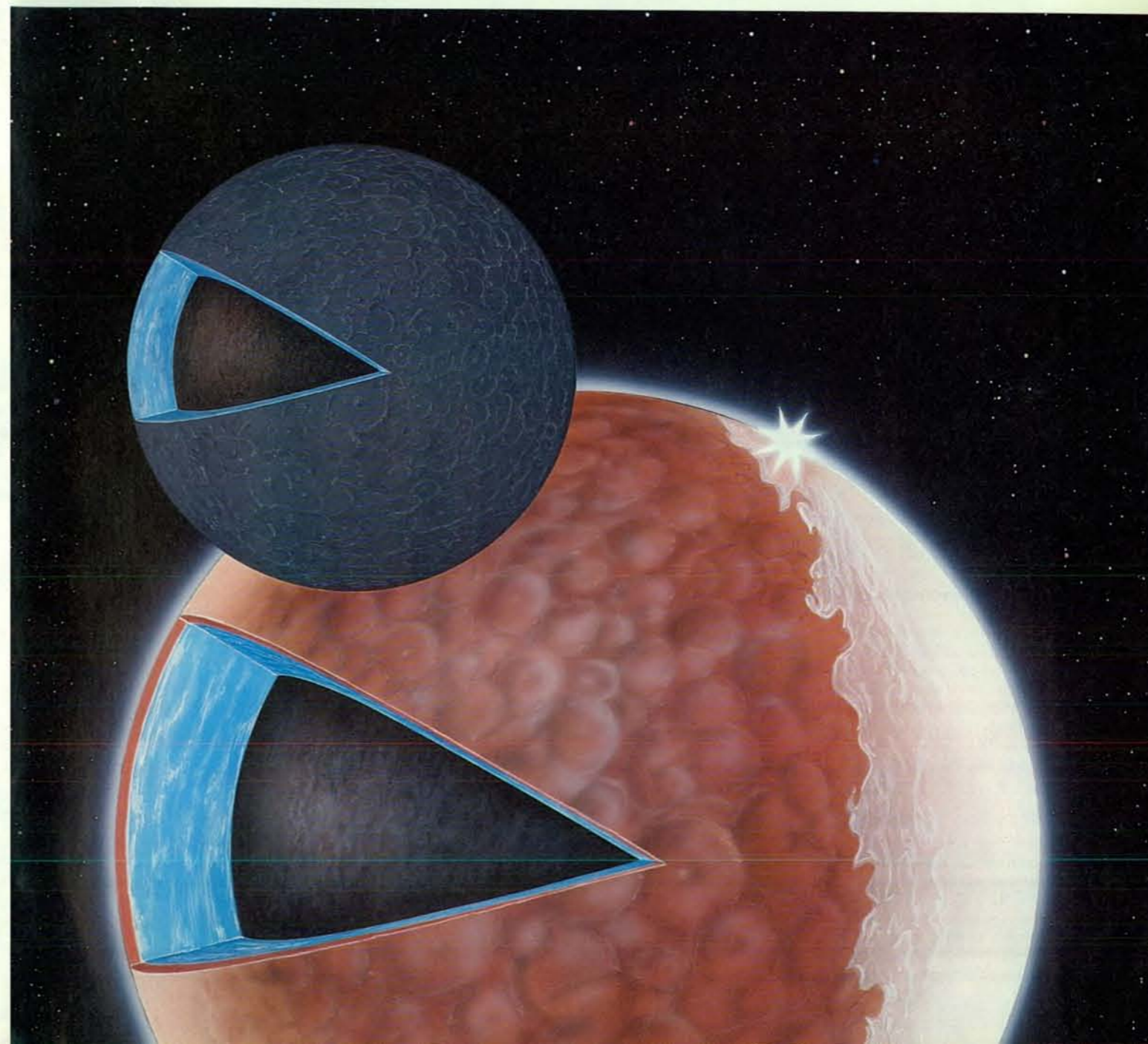
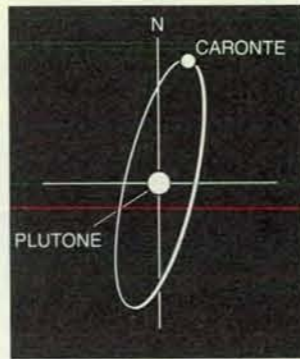
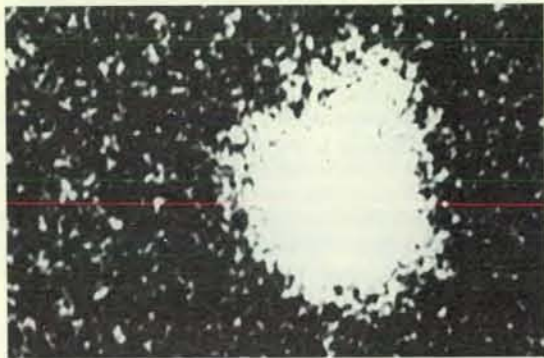
Plutone e Caronte hanno un aspetto sorprendentemente diverso. La superficie di Plutone è coperta di ghiaccio di metano reso rossastro dalla radiazione solare, mentre su Caronte, dove la gravità è più debole, il metano è sfuggito e la superficie è costituita dallo strato di ghiaccio d'acqua sottostante. Entrambi i corpi celesti hanno un grande nucleo roccioso: è evidente quindi che nelle regioni più esterne del sistema solare qualche processo deve aver favorito la formazione di componenti delle rocce rispetto ai composti che producono ghiacci. La luce di una stella occultata da Plutone nel 1988 ha vacillato prima di scomparire: questo indica che il pianeta ha un'atmosfera sottile e opaca. Nel 1985 è iniziata una serie di passaggi di Caronte davanti e dietro Plutone, un fenomeno che ha permesso di compiere le prime misurazioni precise del pianeta.

Supponendo che la sua densità avesse un valore ragionevole per un pianeta, la massa stimata diminuiva di circa 10 volte. Negli anni settanta gli astronomi perfezionarono le misurazioni delle orbite di Urano e di Nettuno, riducendo il valore stimato per la massa di Plutone di altre 10 volte.

Anche la determinazione del diametro di Plutone si è rivelata un compito assai arduo, perché i moti dell'atmosfera terrestre distorcono la luce incidente e la turbolenza riduce la risoluzione dei telescopi ottici installati a terra a circa un secondo d'arco (1/3600 di grado). Il disco di Plutone visto dalla Terra ha un'estensione notevolmente inferiore a un secondo d'arco, quindi qualsiasi valutazione del diametro risultava estremamente soggettiva. I valori proposti nel corso degli anni vanno da 0,5 a 0,2 secondi d'arco, corrispondenti a un diametro compreso tra 14 000 e 6000 chilometri. È stato quest'ultimo valore, pari a circa metà del diametro terrestre, a raccogliere i maggiori consensi.

Date queste valutazioni della massa e del diametro, la densità di Plutone sarebbe stata prossima a quella dei pianeti rocciosi di tipo terrestre del sistema solare interno, e avrebbe superato notevolmente quella dei pianeti esterni gassosi. Verso la metà degli anni settanta divenne evidente che Plutone è un corpo fortemente riflettente, coperto di ghiaccio e quindi probabilmente ancora più piccolo e meno denso di quanto non si fosse creduto in precedenza.

Nel 1978 però, con la scoperta da parte di James W. Christy dello US Naval Observatory del grande satellite di Plutone, ha avuto inizio una vera e propria rivoluzione nell'interpretazione del pianeta. Christy stava compiendo misurazioni estremamente precise della posizione di Plutone per perfezionare le stime della sua orbita (si tratta di un'attività di importanza fondamentale per l'astronomia, ma noiosa e avara di momenti interessanti), ed esaminava le lastre fotografiche di Plutone realizzate con il telescopio da 1,5 metri del Naval Observatory a Flagstaff, nell'Arizona, a qualche chilometro di distanza appena dal sito dove Tombaugh aveva avvistato il pianeta per la prima volta.

Su una delle lastre Christy notò che

Caronte è stato osservato per la prima volta come protuberanza di Plutone, come si vede in questa immagine ripresa dallo US Naval Observatory il 2 luglio 1978 (*a sinistra*). È stato James W. Christy a rendersi conto che questo rigonfiamento era un satellite in orbita intorno al pianeta. L'atmosfera terrestre impedisce di osservare il rapporto effettivo tra le dimensioni dei due corpi, che può essere però determinato per via indiretta (*a destra*).

l'immagine di Plutone mostrava un leggero rigonfiamento presso la sommità, mentre le immagini delle stelle erano rotonde. Altre lastre impressionate in notti diverse indicavano che il rigonfiamento girava intorno al pianeta con un periodo di 6,4 giorni, pari al valore conosciuto del periodo di rotazione di Plutone. Christy e il suo collaboratore Robert S. Harrington compresero che questa gibbosità è in realtà un satellite che si muove in orbita sincrona con la rotazione del pianeta. Di conseguenza Plutone e Caronte rivolgono l'uno verso l'altro sempre lo stesso emisfero, come avviene per la Luna con la Terra. Christy propose di chiamare il satellite Caronte (Charon in inglese) sia in onore della moglie Charlene sia perché nella mitologia classica Caronte traghetta le anime dei defunti attraverso il fiume Stige portandole negli inferi, il regno del dio Plutone.

I planetologi salutarono con grande entusiasmo la scoperta di Caronte, che avrebbe finalmente permesso di calcolare con precisione la massa di Plutone: il periodo dell'orbita di due oggetti che ruotano l'uno intorno all'altro, infatti, è determinato dalla distanza tra gli oggetti stessi, dalla loro massa e dalle ben note leggi della gravitazione universale. Le misurazioni dell'orbita di Caronte rivelarono che la massa totale del sistema composto da Plutone e Caronte è pari a circa 1/400 di quella della Terra, abbassando ancora una volta di un fattore 10 la maggior parte delle stime precedenti. Le misurazioni effettuate in seguito hanno ritoccato di pochissimo questo valore.

Poco dopo la scoperta di Caronte gli astronomi hanno compreso che in due momenti nel corso della rivoluzione di Plutone intorno al Sole, che dura 248 anni, l'allineamento tra la Terra e Plutone permette di osservare di taglio l'orbita di Caronte. In queste circostanze il satellite, visto dalla Terra, passa davanti o dietro al pianeta ogni 3,2 giorni (metà del periodo dell'orbita). A questi fenomeni si dà comunemente il nome di eclissi, anche se il disco di Caronte è più piccolo di quello di Plutone, e quindi più propriamente si dovrebbe parlare di transiti (quando Caronte passa davanti a Plutone) e di occultazioni (nel caso inverso).

Contrariamente a quanto accade di solito per le occasioni che si presentano una volta ogni cento anni, gli astronomi non hanno dovuto attendere eccessivamente a lungo per assistere a questi fenomeni. Le previsioni iniziali indicavano che le eclissi avrebbero potuto avere inizio anche solo uno o due anni dopo la scoperta di Caronte, ma via via che le misurazioni dell'inclinazione dell'orbita di Caronte venivano perfezionate si spostò la data di inizio prevista alla prima metà degli anni ottanta. Se Christy non avesse notato il rigonfiamento sulle sue lastre fotografiche, la serie di eclissi oggi in corso (la prima dai tempi della guerra di secessione) sarebbe probabilmente passata inosservata.

L'imminenza delle eclissi ha indotto nella comunità degli astronomi un'entusiasmo almeno pari a quello destato dalla scoperta stessa di Caronte: è difficile infatti immaginare un esperimento naturale migliore per poter stabilire il diametro e le caratteristiche della superficie dei due corpi celesti. Dai tempi di inizio e di fine delle eclissi si può ricavare il diametro dei due corpi il quale, insieme alle nuove determinazioni della massa totale del sistema, fornisce la densità di Plutone, che è un dato essenziale per poter formulare ipotesi sulla struttura interna del pianeta e sulle modalità della sua formazione.

La luminosità totale di Plutone e Caronte varia via via che il satellite nasconde zone più chiare o più scure della superficie del pianeta e viceversa. Una serie di transiti e occultazioni permette quindi di ricavare carte, per quanto grezze, di un emisfero di ciascuno dei due corpi. Inoltre le occultazioni di Caronte da parte di Plutone offrono l'occasione di misurare separatamente lo spettro di ognuno dei due oggetti e quindi di stabilirne la composizione superficiale.

I planetologi si sono immediatamente lanciati nella corsa a cogliere questa occasione eccezionale. J. Derral Mulholland dell'Università della Florida e io abbiamo iniziato osservazioni sistematiche di Plutone nel 1982 presso il McDonald Observatory dell'Università del Texas. Altri colleghi impegnati in preparativi analoghi erano David J. Tholen dell'Università di Hawaii ed Edward F. Tedesco del Jet Propulsion Laboratory di Pasadena, in California. Le nostre osservazioni consistevano principalmente nella misurazione della luminosità di Plutone con una precisione di qualche decimo di punto percentuale. Ai telescopi a terra Plutone e Caronte appaiono sovrapposti in un'unica immagine; un'eclissi produrrebbe quindi un calo della loro luminosità totale dovuto al fatto che uno dei due corpi copre in tutto o in parte la superficie dell'altro.

Si prevedeva che nelle prime eclissi Plutone e Caronte si sarebbero sovrapposti solo marginalmente, e che quindi la luminosità totale sarebbe diminuita di non più di qualche punto percentuale; per individuare l'inizio della serie di fenomeni si rendeva perciò necessario conoscere nei particolari le variazioni periodiche della luminosità di Plutone che si verificano nel corso della sua rotazione. Queste variazioni, causate presumibilmente dalla presenza sulla superficie di zone più chiare e più scure, erano state rilevate per la prima volta negli anni cinquanta ed erano state sfruttate per determinare il periodo di rotazione del pianeta, di 6,4 giorni. È interessante notare che con l'avvicinarsi di Plutone al perielio l'ampiezza delle fluttuazioni è andata aumentando dal 10 al 30 per cento circa, mentre la luminosità assoluta del pianeta è diminuita del 30 per cento circa.

Questo comportamento deriva quasi sicuramente dalla variazione dell'orientazione reciproca di Plutone e della Terra e dal fatto che l'asse di rotazione del pianeta ha un'inclinazione peculiare. Quasi tutti i pianeti hanno un asse di rotazione approssimativamente perpendicolare al piano della loro orbita e, dal punto di vista di un ipotetico osservatore posto sopra il piano del sistema solare, ruotano su se stessi in senso antiorario.

La scoperta di Caronte ha permesso di determinare l'inclinazione dell'asse di Plutone perché le stesse forze gravitazionali che hanno sincronizzato il moto orbitale di Caronte con la rotazione di Plutone hanno anche allineato il piano dell'orbita del satellite con quello equatoriale del pianeta. Lo studio di quest'orbita ha rivelato che l'asse di rotazione di Plutone è inclinato di 122 gradi: il pianeta risulta quindi «rovesciato» e il suo polo nord (quello dal quale la rotazione appare antioraria) giace al di sotto del piano dell'orbita. È quanto accade anche per Venere e Urano, gli assi dei quali sono inclinati rispettivamente di 177 e di 98 gradi.

La fortissima inclinazione dell'asse di rotazione plutoniano conferisce all'aspetto del pianeta visto da terra una variabilità notevole a seconda della sua posizione rispetto al Sole. Agli inizi degli anni cinquanta il polo sud di Plutone puntava infatti approssimativamente in direzione della Terra, ma in seguito il moto orbitale ne ha variato lentamente l'orientazione, così che oggi dalla Terra si vede una zona del pianeta più prossima all'equatore.

Robert L. Marcialis dell'Università dell'Arizona e Marc W. Buie dello Space Telescope Science Institute hanno cercato di mettere a punto un modello della distribuzione delle regioni chiare e scure sulla superficie di Plutone, modello che fosse in grado di riprodurre le variazioni di luminosità che il pianeta mostra al variare del punto di vista sotto il quale lo si osserva.

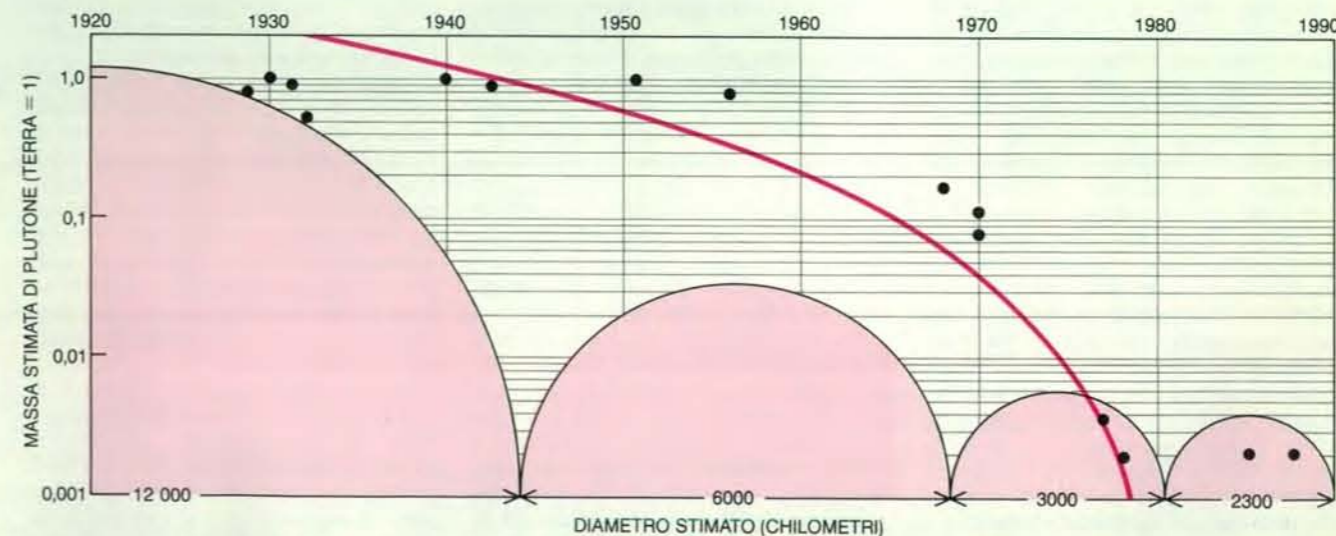
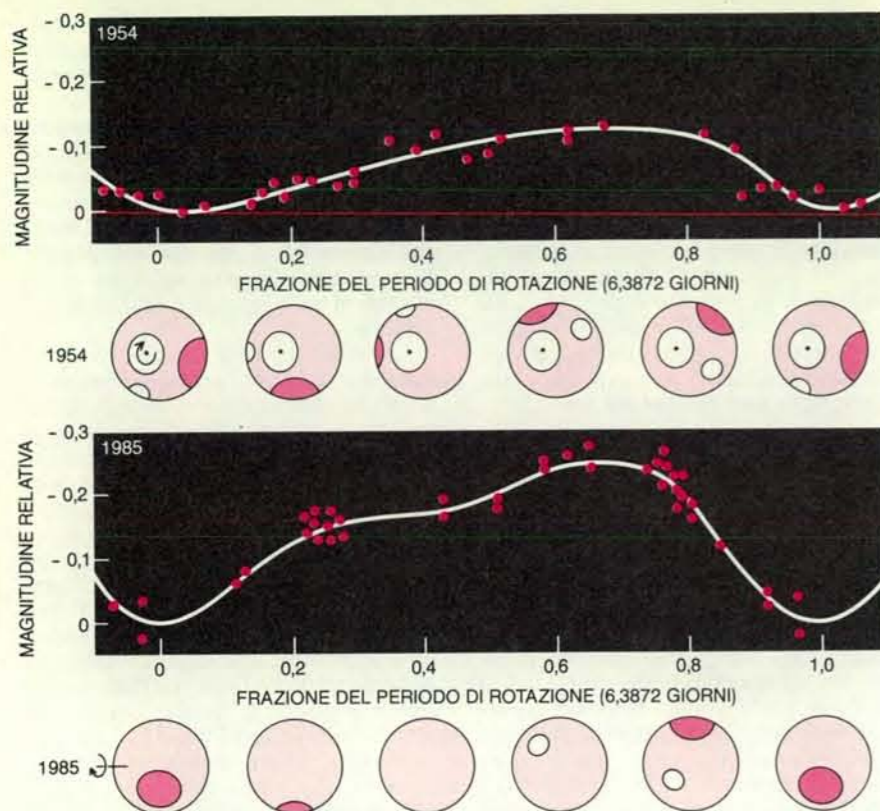
Sembra che le macchie chiare e scure che fanno variare la luminosità di Plutone con un periodo di 6,4 giorni si trovino alle basse latitudini e che quindi appaiano e scompaiano dal campo visivo durante la rotazione. Il progressivo oscuramento a lungo termine del pianeta induce a ritenere che le regioni polari di Plutone posseggano un'albedo, o riflettività, relativamente elevata. Negli anni cinquanta Plutone appariva più brillante perché la regione del polo sud, fortemente riflettente, puntava verso la Terra e restava in gran parte visibile per tutta la durata della rotazione; perciò a ogni rotazione corrispondeva solo una leggera oscillazione della luminosità. Via via che il terreno più scuro e vario delle regioni equatoriali entrava nel campo visivo, Plutone si affievoliva e l'ampiezza delle oscillazioni di luminosità aumentava (*si veda l'illustrazione a pagina 18*).

Un fattore ancora sconosciuto è il contributo di Caronte alla curva di luce osservata nel corso della rotazione. Nel caso limite Caronte potrebbe avere un emisfero bianco e uno nero, contribuendo così anche per il 50 per cento alla variazione periodica complessiva. Inoltre la riflettività di Plutone potrebbe subire variazioni stagionali dovute all'inclinazione dell'asse e alla notevole variazione della sua distanza dal Sole.

I dubbi sull'inclinazione dell'orbita di Caronte e sul rapporto tra i diametri dei due corpi celesti rendevano ardua la determinazione della data delle prime eclissi, che per di più potevano essere occultate dalla luce del Sole o della Luna, oppure da nubi. I tentativi di individuare le prime eclissi nel 1982, 1983 e 1984 non ebbero esito ma, finalmente, nel mattino chiaro e terso del 17 febbraio 1985, il lungo lavoro di sorveglianza fu adeguatamente ricompensato: le mie misurazioni fotometriche compiute con il telescopio da 91 centimetri del McDonald Observatory evidenziarono un netto abbassamento della luminosità di Plutone, pari al 3 per cento circa nell'arco di due ore, abbassamento che indicava un transito parziale di Caronte di fronte al pianeta. La luminosità delle stelle di riferimento vicine rimase costante entro un margine dello 0,5 per cento, a riprova del fatto che l'oscuramento non era dovuto a nubi o foschie di origine terrestre.

L'epoca dell'evento dava credibilità a un'osservazione dubbia compiuta il 16 gennaio 1985 da Tedesco e Bonnie J. Buratti del Jet Propulsion Laboratory, che allora non avevano annunciato la scoperta per alcune incertezze sulla validità delle misurazioni, a causa di un problema alla strumentazione. Il 20 febbraio fu Tholen a confermare l'inizio delle eclissi reciproche di Plutone e Caronte misurando, con il telescopio da 2,2 metri dell'Università di Hawaii sul Mauna Kea, un affievolimento del 2 per cento durante il passaggio di Caronte dietro Plutone.

La variazione delle posizioni reciproche del Sole, della Terra e di Plutone fa sì che lo schema dei transiti e delle occultazioni muti continuamente (*si veda l'illustrazione a pagina 19*). Se le eclissi venissero osservate dal Sole, la posizione relativa di Caronte e dell'ombra proiettata da esso si sposterebbe con moto semplice e regolare da destra a sinistra, al susseguirsi dei transiti. Tuttavia la Terra si sposta da un lato all'altro del Sole nel corso di sei mesi, provocando una variazione ciclica nell'orientazione apparente del sistema Plutone-Caronte: le posizioni relative dei due dischi dipendono dalla linea di vista Terra-Plutone, mentre le posizioni delle loro ombre dipendono dalla linea di vista Sole-Plutone.

Nelle prime eclissi del 1985 Caronte passava di fronte al polo nord di Plutone e scompariva dietro il polo sud, ma i due dischi si sovrapponevano appena; nel 1986 invece gli oscuramenti reciproci erano molto più completi. Sia i transiti sia le occultazioni nascondevano una stessa area della superficie del sistema, ma l'affievolimento risultava più marcato nel corso di un transito, a dimostrazione del fatto che evidentemente una data area di Plutone emette più luce

Le prime stime del diametro e della massa di Plutone erano tutte sbagliate per eccesso perché si supponeva erroneamente che la gravità del pianeta perturbasse l'orbita di Urano e Nettuno. Dopo decenni di ridimensionamenti alcuni astronomi notarono scherzosamente come la curva che riproduceva la rapida diminuzione nel tempo della massa stimata del pianeta indicasse che Plutone sarebbe svanito nel 1980! Alla fine l'analisi dell'orbita di Caronte ha indicato che la massa del sistema è circa 1/400 di quella della Terra.

La luminosità di Plutone varia nel corso della rotazione del pianeta su se stesso. Nel 1954 il polo sud del pianeta puntava verso la Terra ed era quindi sempre visibile (*in alto*). Ma nel frattempo Plutone si è spostato lungo l'orbita e attualmente lo si vede di lato. La sua intera regione equatoriale entra ed esce dal campo visivo durante la rotazione, facendo variare la luminosità del 30 per cento (*in basso*). Inoltre Plutone si è complessivamente affievolito, una circostanza che indica come la regione equatoriale sia più scura del polo sud.

della superficie corrispondente su Caronte. Ne consegue che Caronte è prevalentemente coperto da materia più scura di quella della superficie di Plutone; nel complesso infatti Plutone riflette circa il 50 per cento della luce incidente, mentre Caronte ne riflette meno del 40 per cento.

Le occultazioni totali di Caronte da parte di Plutone sono iniziate nel 1987, e per la prima volta è stato possibile distinguere l'uno dall'altro gli spettri dei due corpi. Dato che ogni elemento o composto chimico assorbe la luce in maniera caratteristica, lo spettro di un corpo celeste permette di dedurne la composizione. Durante le occultazioni Caronte scompariva per circa un'ora, permettendo di misurare lo spettro del solo Plutone. Sottraendo lo spettro così ottenuto da quello complessivo, ricavato prima o dopo un'occultazione, restava quello del solo Caronte.

Lo spettro di Plutone presenta un ampio minimo alle lunghezze d'onda dell'infrarosso intorno a 0,9 micrometri (lunghezze d'onda di poco superiori a quelle della luce rossa visibile) causato dall'assorbimento da parte del metano (CH_4) congelato sulla superficie del pianeta. Questa scoperta è stata effettuata nel 1976 da Dale P. Cruikshank, David D. Morrison e Carl B. Pilcher dell'Università di Hawaii.

Lo spettro di Caronte invece non presenta massimi o minimi particolarmente pronunciati a lunghezze d'onda inferiori a un micrometro. All'occhio umano Caronte apparirebbe di un grigio neutro smorto, mentre Plutone sembrerebbe rossastro. Le misurazioni dello spettro di Caronte a lunghezze d'onda maggiori nell'infrarosso indicano che il satellite è coperto di ghiaccio d'acqua. È questa diversa composizione a spiegare probabilmente la maggior riflettività del pianeta rispetto al suo satellite.

Come è possibile che due corpi così strettamente legati abbiano una superficie tanto diversa? Probabilmente la gravità di Caronte è tanto debole che esso non è riuscito a trattenere il metano che veniva vaporizzato dal calore del Sole lontano. In questo modo il metano è stato allontanato dalla superficie del satellite scoprendo uno strato sottostante di ghiaccio d'acqua, più denso; nel caso di Plutone, invece, la gravità più intensa gli ha permesso di conservare lo strato superficiale di metano congelato. Gli astronomi ritengono che la composizione interna dei due corpi sia simile; è quindi probabile che sotto la superficie di metano di Plutone si trovi uno strato di ghiaccio d'acqua.

Grazie a questa serie di eclissi è stato finalmente possibile ricavare misurazioni precise delle dimensioni di Plutone e di Caronte. A condizione di conoscere la distanza tra i due corpi è infatti possibile calcolare, da misurazioni accurate dell'inizio e della fine dei transiti e delle occultazioni, le dimensioni del pianeta e del suo satellite. Attualmente il metodo migliore per stabilire questa distanza è la tecnica dell'interferometria a macchie (*speckle interferometry*), che permette di ottenere misurazioni ad alta risoluzione utilizzando esposizioni molto brevi per «congelare» la turbolenza dell'atmosfera terrestre ed evitarne l'effetto di offuscamento. Osservazioni condotte con questo metodo da James Beletic e Richard Goody della Harvard University, combinate con i vincoli imposti dai tempi registrati delle eclissi, danno per il raggio dell'orbita di Caronte una valutazione di 19 640 chilometri, con un margine di errore pari circa al 2 per cento.

Il tentativo più organico di misurare il diametro di Plutone e di Caronte sulla base dei tempi di inizio e fine delle eclissi, dovuto a Tholen, fornisce un valore di 2300 chilometri per il primo e di 1186 per il secondo, con un'approssimazione dell'uno per cento circa. Plutone risulta quindi il pianeta più piccolo di tutto il sistema solare, con un diametro pari a metà di quello di Mercurio, ritenuto un tempo il più piccolo dei pianeti, e a soli due terzi di quello della Luna. Il diametro di Caronte è pari a circa metà di quello di Plutone, cosa che ne fa il satellite più grande del sistema solare in proporzione al pianeta intorno al quale orbita. Prima della scoperta di Caronte questo primato spettava alla Luna, che ha un diametro leggermente superiore a un quarto di quello della Terra. Nell'ipotesi che Plutone e Caronte abbiano densità simili, il centro di massa del sistema si troverebbe in posizione intermedia fra i due corpi, a circa 1200 chilometri dalla superficie di Plutone. Per tutti gli altri sistemi noti di pianeti e satelliti il centro di massa si trova in profondità nell'interno del pianeta. Questa particolarità ha indotto alcuni astronomi a considerare il sistema Plutone-Caronte come un pianeta doppio.

Conoscendo il diametro e la massa totale di Plutone e Caronte se ne può calcolare la densità media. L'individuazione del metano nello spettro di Plutone negli anni settanta indusse gli astronomi a supporre che il pianeta fosse composto di metano congelato, acqua e altri composti leggeri che si ritiene fossero presenti nelle regioni più esterne della nebulosa dalla quale si è formato il sistema solare. Di conseguenza si è pensato che la densità di Plutone debba essere bassa, probabilmente non superiore a quella dell'acqua (che è di un grammo/centimetro cubo).

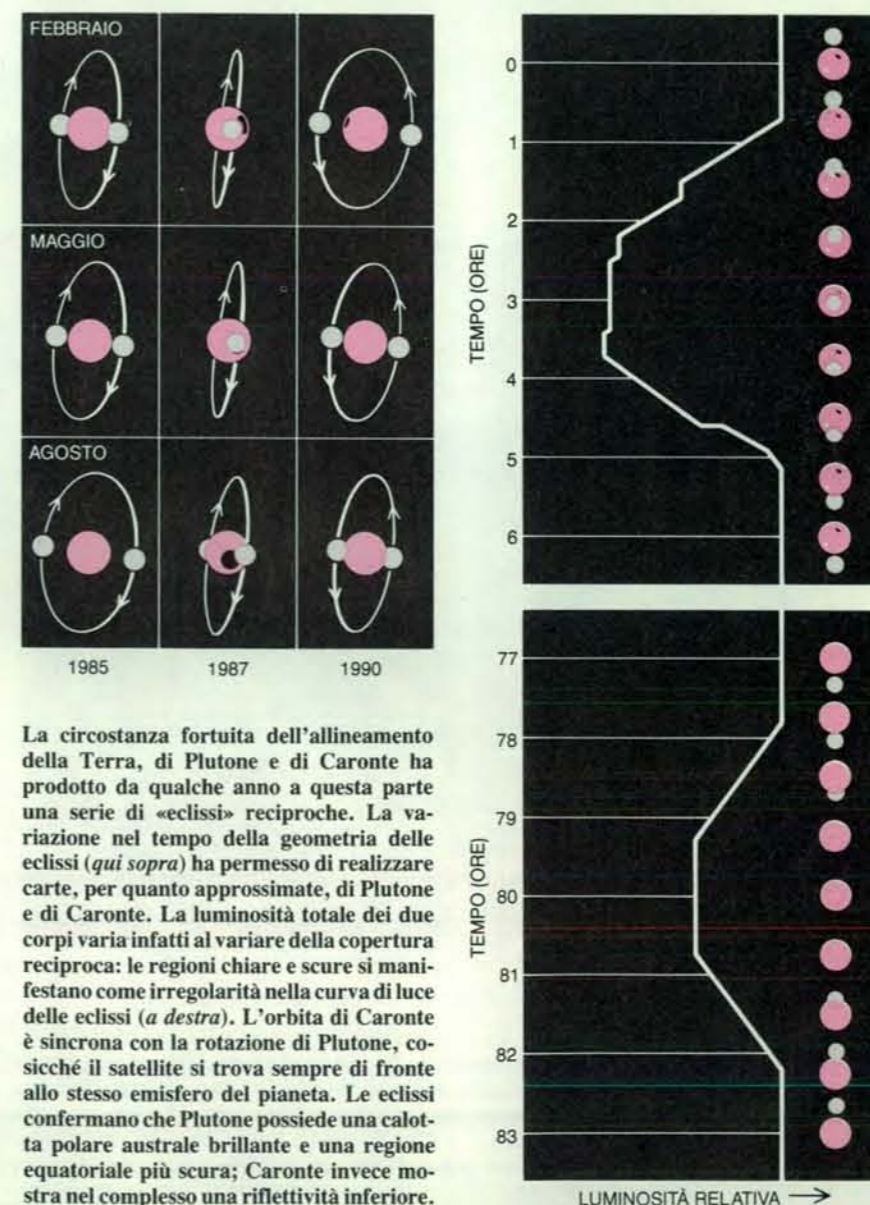
Calcoli recenti mostrano invece che la densità di Plutone supera leggermente i due grammi/centimetro cubo, e questo significa che oltre ai ghiacci il pianeta deve contenere una quantità notevole di materiale roccioso. Le misurazioni del raggio dell'orbita di Caronte e della velocità del suo moto di rivoluzione forniscono solo la massa totale del sistema, quindi la densità calcolata è solo una media di quelle di Plutone e Caronte. Nonostante le recenti difficoltà, si spera ancora che dalla sua posizione privilegiata lo *Hubble Space Telescope*, lanciato in orbita alla fine dello scorso aprile, riesca a stabilire con precisione il raggio dell'orbita e la posizione del centro di massa del sistema, permettendo di calcolare le masse e le densità relative dei due oggetti, e quindi di evidenziare eventuali rilevanti differenze nella loro composizione interna.

Le eclissi, che pure hanno dato numerose nuove informazioni sulla composizione superficiale e interna di Plutone e di Caronte, non possono aiutarci a stabilire se intorno a Plutone esiste un'atmosfera rarefatta, la cui presenza è stata oggetto di discussioni animate nel corso degli ultimi dieci anni. All'inizio si era interpretata la «firma» caratteristica del metano, individuata nello spettro di Plutone già nel 1976, attribuendola a uno strato di metano congelato sulla superficie, ma nel 1980 Uwe Fink dell'Università dell'Arizona ha effettuato misurazioni spettrali più precise e ne ha dedotto che il metano in realtà è presente in forma gassosa. La carenza di buoni spettri di laboratorio del metano in condizioni di pressione e temperatura simili a quelle di Plutone ha impedito finora di stabilire con certezza se le osservazioni telescopiche indichino la presenza di ghiaccio o quella di gas; quasi tutti gli studiosi ritengono che siano presenti entrambi.

Per fortuna la natura offre un metodo per rilevare in maniera inequivocabile l'esistenza di un'atmosfera: l'occultazione di una stella. Quando un pianeta o un altro corpo celeste passa davanti a una stella, l'eventuale atmosfera ne distorce e ne smorza la luce in maniera caratteristica. Per trent'anni gli astronomi hanno cercato di individuare stelle che si trovassero direttamente sulla traiettoria di Plutone nel suo moto apparente sulla volta celeste, ma il pianeta ha evitato per lungo tempo di occultare qualsiasi stella di luminosità accettabile: il lieve vacillare della luce di una stella osservato durante un passaggio radente nel 1980 è stato presumibilmente causato da Caronte, mentre una possibile occultazione nel 1985 è stata vanificata da condizioni di osservazione scadenti. Inoltre è difficile prevedere con precisione la posizione di Plutone rispetto alle stelle a causa delle oscillazioni che l'attrazione gravitazionale di Caronte induce nel suo moto e dell'incertezza sul diametro del pianeta.

Nel 1985 Douglas J. Mink della Harvard University e Arnold R. Klemola del Lick Observatory hanno identificato una stella di dodicesima grandezza nella costellazione della Vergine che sembrava situata proprio sul percorso di Plutone, e hanno previsto che si sarebbe verificata un'occultazione il 9 giugno 1988. Successivi calcoli di Lawrence H. Wasserman del Lowell Observatory stabilirono che l'ombra di Plutone sarebbe passata su alcune regioni dell'Australia, della Nuova Zelanda e del Pacifico meridionale.

Due gruppi di astronomi, guidati da Robert L. Millis del Lowell Observatory e da James L. Elliot ed Edward W. Dunham del Massachusetts Institute of Technology intrapresero altrettante spedizioni per osservare il fenomeno, coordinando il proprio impegno con quello di vari osservatori in Australia, in Nuova Zelanda e in Tasmania. Alla fine sono stati otto i punti dai quali si è riusciti a compiere osservazioni.

Mentre scivolava dietro il disco di Plutone, la stella non è scomparsa all'improvviso ma si è affievolita progressivamente; questo comportamento indica con chiarezza che la luce veniva assorbita e rifratta nel passaggio attraverso strati via via più profondi di un'atmosfera. Quando l'immagine della stella è entrata negli strati superiori dell'atmosfera di Plutone la curva di luce ha presentato un abbassamento graduale e regolare e poi una diminuzione brusca una volta che l'immagine è giunta in corrispondenza delle regioni più basse dell'atmosfera.

La circostanza fortuita dell'allineamento della Terra, di Plutone e di Caronte ha prodotto da qualche anno a questa parte una serie di «eclissi» reciproche. La variazione nel tempo della geometria delle eclissi (*qui sopra*) ha permesso di realizzare carte, per quanto approssimate, di Plutone e di Caronte. La luminosità totale dei due corpi varia infatti al variare della copertura reciproca: le regioni chiare e scure si manifestano come irregolarità nella curva di luce delle eclissi (*a destra*). L'orbita di Caronte è sincrona con la rotazione di Plutone, cosicché il satellite si trova sempre di fronte allo stesso emisfero del pianeta. Le eclissi confermano che Plutone possiede una calotta polare australe brillante e una regione equatoriale più scura; Caronte invece mostra nel complesso una riflettività inferiore.

Sembra quindi che Plutone possegga un'alta atmosfera trasparente, sotto la quale si troverebbe uno strato più opaco separato dal primo da un confine evidentemente assai marcato. Per spiegare questa situazione sono stati proposti due diversi modelli. Il primo postula che l'atmosfera di Plutone abbia una temperatura approssimativamente uniforme, ma che la luce solare provochi l'evaporazione dei gas congelati della superficie dando origine a una foschia a bassa quota. Nel secondo modello, invece, l'offuscamento improvviso è dovuto a un cambiamento brusco di temperatura tra due strati dell'atmosfera. Il medesimo gas a temperature diverse devia la luce in misura differente, un fenomeno che sulla Terra è responsabile dello sfavillio delle stelle.

Nonostante siano stati realizzati modelli sia al MIT sia all'Università dell'Arizona, non si è ancora riusciti a stabilire quale delle due spiegazioni sia maggiormente plausibile; tuttavia le proprietà fondamentali dell'atmosfera plutoniana sono ormai abbastanza chiare. In primo luogo è estremamente rarefatta, e la pressione alla superficie è inferiore a un centomillesimo di quella dell'atmosfera terrestre. Oltre al metano, contiene forse gas più pesanti come l'argo, l'azoto (N_2), il monossido di carbonio (CO) e l'ossigeno (O_2). L'azoto è il componente principale dell'atmosfera molto rarefatta di Tritone e per questo motivo numerosi astronomi suppongono che esso costituisca gran parte anche dell'atmosfera di Plutone.

Per prevedere quali gas possano essersi separati dall'atmosfera per congelamento occorre conoscere la temperatura alla superficie di Plutone. Tramite i dati raccolti nell'infrarosso dal satellite IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) della NASA, Mark V. Sykes dell'Università dell'Arizona e colleghi hanno valutato che la temperatura alla superficie nella regione equatoriale di Plutone sia di circa 58 kelvin, un valore compatibile con la presenza di metano nell'atmosfera.

Può darsi che l'esistenza di un'atmosfera possa risolvere un dubbio posto dalle osservazioni delle eclissi del sistema Plutone-Caronte: perché la superficie di Plutone si presenta così luminosa? In media Plutone ha una riflettività più di sette volte maggiore di quella della Luna, un fatto piuttosto sorprendente perché in meno di un milione di anni una superficie brillante di ghiaccio di metano dovrebbe diventare scura e rossastra in seguito a reazioni chimiche causate dalla radiazione ultravioletta proveniente dal Sole e dalle particelle di alta energia dei raggi cosmici. La riflettività di Plutone comporta quindi l'esistenza di un meccanismo che «rinnovi» continuamente lo strato di ghiaccio superficiale.

S. Alan Stern dell'Università del Colorado a Boulder, in collaborazione con Laurence M. Trafton dell'Università del Texas ad Austin e Randall Gladstone dell'Università della California a Berkeley, ha proposto un meccanismo capace di sortire un effetto di questo tipo. A causa della forte eccentricità dell'orbita, la distanza di Plutone dal Sole varia notevolmente (da 4,5 a 7,4 miliardi di chilometri) dando luogo a notevolissime escursioni di temperatura. Può darsi quindi che l'atmosfera di Plutone - se la sua composizione soddisfa certi requisiti - sia solo temporanea e si formi quando il pianeta è più vicino al Sole.

Plutone è arrivato al perielio nel 1989. Durante l'allontanamento si raffredderà sempre più e forse tra 20-40 anni il metano dell'atmosfera condenserà alla superficie, coprendo il pianeta di uno strato di neve di metano che si manterrà fino a quando Plutone non si avvicinerà di nuovo al Sole.

Le eclissi reciproche di Plutone e Caronte e l'occultazione stellare hanno rivelato una serie di nuovi particolari sulle caratteristiche fisiche del pianeta, così da permettere finalmente di esaminare il problema della sua formazione. La densità di Plutone è maggiore di quella dei pianeti esterni gassosi e di quasi tutti i loro satelliti, composti prevalentemente di ghiacci; questo fatto ha spinto alcuni ricercatori, soprattutto anni fa, quando si riteneva che la densità fosse ancora maggiore, a domandarsi se la formazione di Plutone non sia avvenuta altrove, magari nelle vicinanze della Terra e degli altri corpi di alta densità del sistema solare interno.

Grazie a un'occultazione stellare si è potuto dimostrare che Plutone possiede un'atmosfera. Il 9 giugno 1988 gruppi di astronomi collocati in otto punti di osservazione diversi hanno osservato il passaggio di Plutone di fronte a una stella lontana (*in alto*), che si è affievolita progressivamente via via che la sua immagine penetrava nell'atmosfera. Un brusco mutamento di inclinazione della curva di luce (*b* e *f*) osservato dal *Kuiper Airborne Observatory* (*in basso*) indica l'esistenza di uno strato di transizione nell'atmosfera di Plutone, che potrebbe essere una foschia a bassa quota o una zona dove la temperatura varia rapidamente.

I calcoli del moto orbitale di Plutone su un periodo di 845 milioni di anni, dovuti a Gerald J. Sussman e Jack L. Wisdom del MIT, indicano che nel lungo periodo l'orbita di Plutone è caotica; è possibile quindi che esso si sia formato altrove per poi assumere quella che è la sua orbita attuale nel corso dell'evoluzione successiva. In ogni modo questi ricercatori continuano a ritenere più probabile che il pianeta si sia formato nel sistema solare esterno e che il suo comportamento caotico lo abbia portato nella sua orbita attuale, così eccentrica e fortemente inclinata.

A quanto affermano le teorie attualmente accettate, il sistema solare si sarebbe condensato dal collasso di una nebulosa di gas e polvere e diversi studi recenti inducono a pensare che nelle regioni periferiche della nebulosa si possano essere formati corpi relativamente densi. Nelle condizioni di bassa temperatura e pressione di queste regioni, infatti, quasi tutto il carbonio si lega con l'ossigeno formando monossido di carbonio, e solo una piccola percentuale di esso riesce a costituire metano. L'ossigeno, però, è più abbondante del carbonio; l'ossigeno libero residuo può combinarsi allora con il silicio (e formare per esempio SiO_2, in pratica la normale sabbia) e con altri elementi pesanti, costituendo particelle rocciose, oppure con l'idrogeno formando ghiaccio d'acqua (H_2O). Questi studi prevedono che il rapporto tra ghiaccio d'acqua e particelle rocciose debba essere stato di uno a tre in termini di massa, mentre il monossido di carbonio, gassoso, sarebbe stato disperso dal «vento» estremamente intenso emesso dal Sole appena formatosi, lasciando sul posto solo la materia più pesante.

Prendendo le mosse da questa ipotesi William B. McKinnon della Washington University, Steven W. Mueller della Southern Methodist University e Damon P. Simonelli dello Ames Research Center della NASA hanno realizzato modelli particolareggiati della formazione e della composizione interna di Plutone. La densità osservata del pianeta può essere spiegata facilmente nell'ipotesi che esso sia costituito da roccia per una percentuale compresa tra il 68 e l'80 per cento e per il resto da un miscuglio di ghiacci. Questa composizione farebbe di Plutone un corpo più roccioso dei satelliti di Saturno e Urano; questi ultimi condensarono nelle vicinanze dei protopianeti, dove la temperatura e la pressione relativamente elevate distrussero il monossido di carbonio e favorirono invece la formazione di metano e di ghiaccio d'acqua. I satelliti dei pianeti esterni contengono grandi quantità di questi composti leggeri e la bassa densità che li caratterizza induce ad accantonare la vecchia ipotesi secondo la quale Plutone sarebbe un satellite sfuggito a Nettuno.

Di solito lo spettro di Plutone e quello di Caronte non sono separabili, ma quando Caronte è nascosto da Plutone si registra solo la luce del pianeta. I minimi nello spettro di Plutone sono prodotti dal metano. Sottraendo lo spettro di Plutone da quello complessivo si ottiene lo spettro piatto di Caronte (*in alto*). Evidentemente su Caronte non esiste metano; a lunghezze d'onda maggiori (*in basso a sinistra*) il suo spettro assomiglia a quello del ghiaccio d'acqua (*in blu*). Plutone e Caronte sono stati osservati dall'*Infrared Astronomical Satellite* (*in basso a destra*): il blu e il rosso indicano rispettivamente zone più calde e più fredde. I valori misurati sono in accordo con l'esistenza di ghiacci e di un'atmosfera rarefatta.

Da parecchio tempo i planetologi suppongono che Plutone sia simile a Tritone, il maggiore dei satelliti di Nettuno. Prima dell'incontro ravvicinato di *Voyager 2* con Nettuno, Plutone era meglio conosciuto di Tritone, ma oggi la situazione si è capovolta. Il diametro di Tritone (2700 chilometri), la sua densità (2,08 grammi/centimetro cubo) e lo spessore della sua atmosfera sono in effetti molto simili a quelli di Plutone; il valore della densità, in particolare, induce a ritenere che anche Tritone si sia formato come corpo celeste indipendente nelle regioni esterne e fredde della nebulosa protoplanetaria, dove il monossido di carbonio era particolarmente abbondante.

La cattura di Tritone, avvenuta probabilmente non molto tempo dopo la sua formazione, lo ha collocato su un'orbita anomala, retrograda intorno a Nettuno, mentre Plutone è riuscito evidentemente a non farsi né inghiottire, né catturare, né espellere dal sistema solare. Si è invece assestato in una risonanza stabile nel rapporto 3 : 2 con Nettuno, ossia percorre due orbite nel tempo in cui Nettuno ne percorre tre. Di conseguenza Plutone non passa mai a meno di 2,7 miliardi di chilometri da Nettuno, evitando così le gravi perturbazioni che potrebbero sortire da un incontro ravvicinato.

La cattura da parte di Nettuno ha dato inizio a un nuovo corso nell'evoluzione di Tritone: le sollecitazioni gravitazionali e le forze mareali devono averne riscaldato l'interno, e forse si possono attribuire a questo fenomeno le strane e complesse strutture visibili sulla superficie del satellite. Può darsi che anche Plutone abbia subito un significativo riscaldamento interno a causa delle interazioni gravitazionali con Caronte, ma questo dipende dalle modalità di formazione di Caronte.

Al momento della sua formazione l'interno di Plutone era probabilmente abbastanza caldo da permettere ai suoi

vari costituenti di separarsi gli uni dagli altri in ordine di densità: la roccia sarebbe affondata formando un nucleo al di sopra del quale si sarebbe disposta l'acqua, mentre il metano sarebbe risalito a causa della sua minore densità, così da dare origine alla superficie ghiacciata oggi visibile.

Perciò, nel caso in cui Plutone e Caronte si siano formati contemporaneamente come pianeta doppio, è possibile che abbiano una composizione interna simile e che rappresentino un campione quasi inalterato della nebulosa a partire dalla quale il sistema solare si sarebbe condensato. Se invece Caronte si formò in seguito a una collisione tra Plutone e un altro oggetto (per esempio un planetesimo più piccolo) allora Plutone avrebbe subito un ulteriore riscaldamento interno successivo alla sua formazione e la composizione dei due corpi potrebbe essere molto diversa. Oggi sono numerosi i ricercatori che sostengono l'ipotesi collisionale per spiegare l'origine della Luna; nel caso di Plutone e Caronte la determinazione della densità relativa dei due corpi contribuirebbe a svelare l'enigma dell'origine del satellite.

Può darsi che alcune differenze tra la superficie di Tritone e quella di Plutone siano da attribuire all'eccentricità dell'orbita di quest'ultimo e quindi all'esistenza di forti variazioni stagionali. Se così fosse, Plutone potrebbe occupare il primo posto tra tutti i pianeti per quanto riguarda la rilevanza delle interazioni tra atmosfera e superficie. Purtroppo uno studio esauriente della dinamica della superficie e dell'atmosfera plutoniane risulterà impossibile finché il pianeta non potrà essere esaminato da vicino per mezzo di una sonda spaziale. Un passaggio vicino a Plutone, previsto in un primo momento nell'ambito del *grand tour* del sistema solare concepito negli anni settanta (il progetto che poi diede origine alle missioni Voyager) venne scartato per mancanza di fondi e per l'errata convinzione che il pianeta fosse di «scarso interesse».

Queste nuove scoperte sulla complessità di Plutone hanno risvegliato l'interesse della comunità scientifica per una missione spaziale verso questo pianeta così lontano da noi. La traiettoria di una missione di questo tipo dovrà essere il frutto di un compromesso tra il tempo necessario per il viaggio di avvicinamento e la durata del periodo utile per le osservazioni scientifiche. Una velocità di crociera elevata garantisce un viaggio più breve e aumenta le probabilità che la sonda funzioni correttamente al momento di raggiungere il pianeta, ma comporta un passaggio altrettanto breve nelle vicinanze di Plutone, e quindi riduce la durata del periodo utile per riprendere immagini ad alta risoluzione. Una velocità inferiore richiede una maggiore affidabilità a lungo termine degli strumenti a bordo, ma concede un incontro più «tranquillo» con il pianeta.

Una delle ipotesi prese in esame per la missione prevede una coppia di sonde piuttosto semplici, dotate ciascuna di un sistema per la ripresa di immagini, di uno spettrometro e di un magnetometro (per misurare i campi magnetici nella regione di Plutone). Oltre a ciò, i due veicoli porterebbero a bordo uno o più rivelatori di particelle in grado di operare per tutta la durata della missione allo scopo di effettuare misurazioni del vento solare e della enorme «bolla» di particelle cariche che circonda il Sole. Le due sonde seguirebbero traiettorie diverse, sfruttando la spinta gravitazionale della Terra e quella di Giove, e arriverebbero in prossimità di Plutone a circa un anno di distanza l'una dall'altra. Il lancio potrebbe avvenire verso l'inizio del prossimo secolo e il viaggio di avvicinamento richiederebbe circa 14 anni. Il periodo di vicinanza a Plutone, nel senso più lato, durerebbe vari mesi, ma per le osservazioni particolareggiate che sono possibili durante un passaggio ravvicinato si avrebbe a disposizione non più di qualche ora.

L'invio di due sonde aumenterebbe le probabilità di successo della missione e il costo sarebbe di poco superiore a quello della realizzazione di un solo veicolo, grazie alle economie di scala. Se entrambe le sonde riuscissero nella loro impresa sarebbe possibile studiare su Plutone fenomeni dipendenti dal tempo (come le variazioni dell'atmosfera) e ottenere immagini ad alta risoluzione di entrambi gli emisferi sia di Plutone, sia del suo satellite Caronte, un'impresa impossibile nell'ambito di un solo incontro data la lentezza con cui i due oggetti ruotano su se stessi.

Una missione verso Plutone costituirebbe il completamento della ricognizione preliminare che già è stata effettuata su tutti i corpi principali del sistema solare. Ogni volta che un pianeta ci ha svelato alcuni dei suoi segreti, si è palesata un po' di più la diversità meravigliosa e stupefacente della natura: quando finalmente sarà possibile inviare una missione verso Plutone, potremo ancora una volta aspettarci con ragione di trovare qualcosa di imprevisto.

BIBLIOGRAFIA

TOMBAUGH CLYDE e MOORE PATRICK, *Out of the Darkness: The Planet Pluto*, Stackpole Books, 1980.

LITTMANN MARK, *Planets Beyond: Discovering the Outer Solar System*, John Wiley & Sons, Inc., 1988.

LITTMANN MARK, *Where Is Planet X?* in «Sky & Telescope», 78, n. 6, dicembre 1989.

BEATTY J. KELLY e altri (a cura), *The New Solar System*, terza edizione, Cambridge University Press, 1990.

La Dorsale medio-oceanica

Recenti rilevamenti sismici e gravimetrici forniscono nuovi dati sulla evoluzione dei segmenti di quella che è la più lunga catena montuosa, la più attiva area vulcanica e la regione meno accessibile della Terra

di Kenneth C. Macdonald e Paul J. Fox

L'8 luglio 1982 ci imbarcammo sulla nave da ricerca oceanografica *Thomas Washington* per una serie di rilevamenti sulla Dorsale del Pacifico orientale, una catena montuosa vulcanica che si trova sotto l'Oceano Pacifico e che fa parte della struttura lunga 75 000 chilometri denominata Dorsale medio-oceanica. Come la cucitura di una palla da baseball, la dorsale serpeggia intorno alla Terra dal Mar Glaciale Artico all'Oceano Atlantico, intorno ad Africa, Asia e Australia, sotto l'Oceano Pacifico e lungo la costa occidentale dell'America Settentrionale. Sebbene la dorsale sia decisamente la più lunga struttura della superficie terrestre, le sue caratteristiche fisiografiche erano meno note di quelle dei crateri sulla faccia nascosta della Luna.

Alcuni colleghi della Scripps Institution of Oceanography avevano da poco equipaggiato la *Thomas Washington* con un nuovo tipo di sistema sonar, il SeaBeam, costruito dalla General Instrument Corporation. Esso era in grado di cartografare una fascia di fondo oceanico larga due chilometri con una singola emissione del sonar. Speravamo quindi che potesse rivelare nuovi dettagli del fondo oceanico e migliorare le nostre conoscenze sulle forze che formano e modellano la Dorsale medio-oceanica.

Dopo aver navigato per 2500 chilometri verso sud-est, dalla base di San Diego della Scripps Institution, intersecammo la cresta della Dorsale del Pacifico orientale, situata a una profondità di circa 2500 metri. La dorsale segna il limite tra la zolla tettonica del Pacifico e quella delle Cocos. Le zolle si separano a una velocità di circa 120 millimetri all'anno e nel contempo si formano spaccature lungo la cresta della dorsale, che permettono alla roccia fusa di infiltrarsi dal mantello sottostante. Una parte del magma si riversa in tremende eruzioni sul fondo oceanico e poi solidifica formando ogni anno molti chilometri quadrati di nuova crosta oceanica. Trovandoci solo a poche migliaia di metri al di sopra di questa attività, ci sentivamo come lillipuziani in movimento lungo la spina dorsale di un gigante addormentato che poteva svegliarsi in qualunque istante.

Mentre il SeaBeam esplorava la spina dorsale di questo gigante, noi osservavamo le immagini del paesaggio abissale sugli schermi a bordo della *Thomas Washington*. Potevamo vedere strutture sottomarine a noi familiari: la formazione più elevata che segna l'asse della dorsale e le grandi spaccature (faglie trasformi) che dislocano di centinaia di chilometri i segmenti di dorsale. Tuttavia, insieme a Peter F. Lonsdale della Scripps Institution, scorgevamo anche strutture sconosciute: segmenti incurvati e catene che si affiancavano, accompagnate da crosta oceanica deformata e distorta.

Sin dai primi anni ottanta alcuni nostri colleghi francesi, britannici e statunitensi hanno esplorato molti tratti della Dorsale del Pacifico orientale e di altre parti della Dorsale medio-oceanica. Questi studi hanno rivelato che la dorsale presenta molte discontinuità laterali che frazionano il suo asse in segmenti. Sebbene queste discontinuità differiscano per forma e comportamento, sono in gran parte più profonde e vulcanicamente meno attive dei segmenti da esse definiti. La cresta della dorsale presenta così ondulazioni verso l'alto e verso il basso di centinaia di metri su distanze variabili fra i 10 e i 1000 chilometri. Negli ultimi anni siamo riusciti a comprendere come queste discontinuità e questi segmenti si evolvano e come siano correlati a ciò che avviene nelle profondità della crosta e del mantello terrestri.

L'espansione dei fondi oceanici

L'oceanografo americano Bruce C. Heezen definì in maniera efficace la Dorsale medio-oceanica come «la ferita che non cicatrizza mai». Nel 1956, insieme con W. Maurice Ewing, notò che i terremoti nei bacini oceanici hanno origine in una fascia continua che circonda la Terra. Poiché la fascia coincideva con porzioni della Dorsale medio-oceanica allora conosciute, i due scienziati avanzarono l'ipotesi che la Terra fosse circondata da un sistema continuo di dorsali oceaniche. Da allora oceanografi e geologi hanno tentato di osservare più da vicino la Dorsale medio-oceanica, per comprenderne le origini.

I processi geologici globali che formano e modellano la dorsale non furono compresi fino al 1960, quando Harry H. Hess della Princeton University introdusse il concetto di espansione dei fondi oceanici. Altri studiosi rifinirono e svilupparono ulteriormente la sua ipotesi, nella teoria della tettonica a zolle. Secondo questa teoria la crosta e il mantello superiore sono divisi in alcune decine di zolle che possono muoversi l'una rispetto all'altra. Quando due zolle si separano può risalire materiale dal mantello, così da formare una dorsale e nuova crosta oceanica.

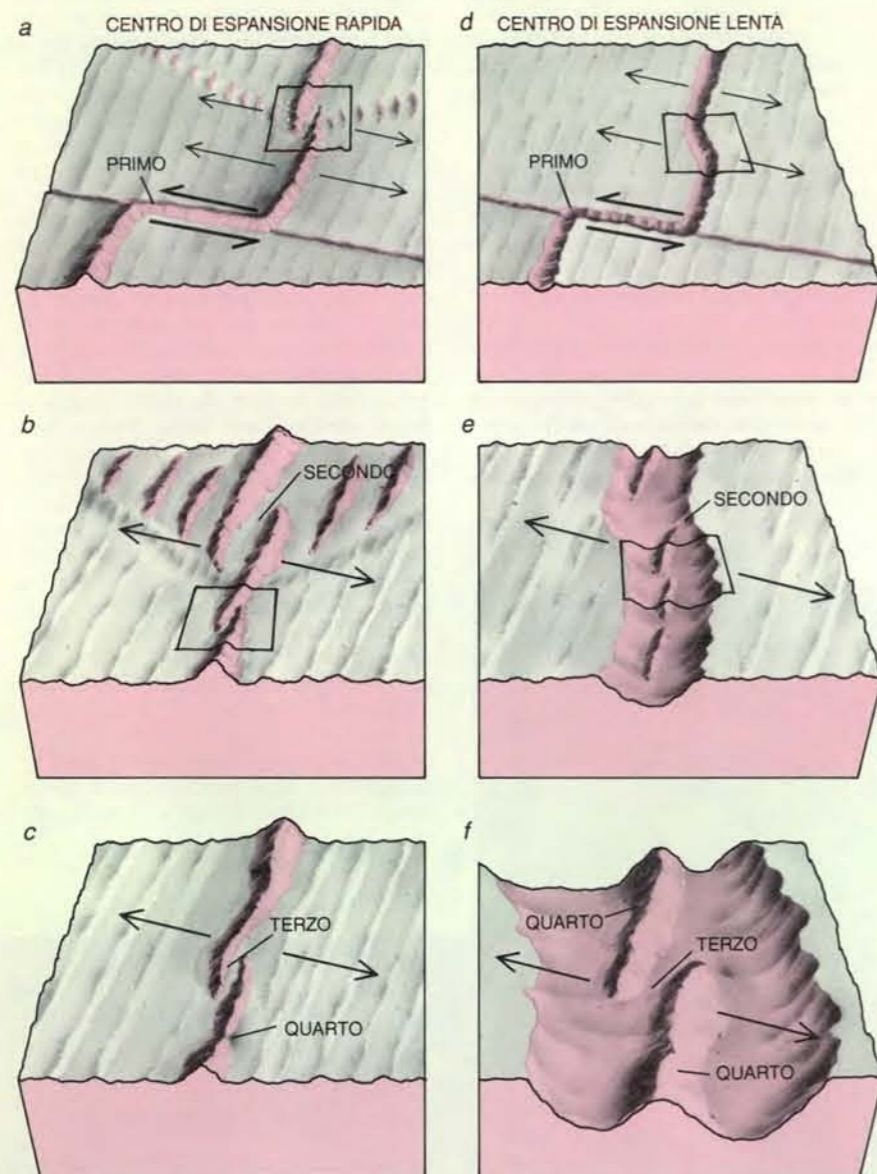
La teoria della tettonica a zolle spiega le più grandi strutture della Dorsale medio-oceanica. Tuttavia già nel 1960 H. William Menard della Scripps Institution e Heezen scoprirono che la Dorsale medio-oceanica è una struttura discontinua. Cartografando la dorsale con apparecchi sonar trovarono molti punti in cui essa era spostata ad angolo retto rispetto alla sua direzione longitudinale. Nel 1965 J. Tuzo Wilson dell'Università di Toronto identificò queste discontinuità come faglie trasformi: superfici di frattura disposte perpendicolarmente alla lunghezza della dorsale, dove i margini delle zolle tettoniche slittano l'uno rispetto all'altro in direzioni opposte. In seguito Richard N. Hey dell'Università di Hawaii notò che i segmenti definiti da due faglie trasformi potevano spostarsi in direzione parallela all'asse della dorsale. Questo tipo di discontinuità fu chiamato «rift in propagazione».

Verso gli anni ottanta gli oceanografi avevano identificato molte faglie trasformi e rift in propagazione, notando anche che parti differenti della Dorsale medio-oceanica si evolvevano a velocità differenti. Infatti, mentre le zolle che danno origine alla Dorsale del Pacifico orientale si separano a velocità elevata, compresa fra i 60 e i 170 millimetri all'anno (si veda l'articolo *La cresta della Dorsale pacifica-orientale* di Ken C. Macdonald e Bruce P. Luyendyk in «Le Scienze» n. 155, luglio 1981), le zolle che formano la Dorsale medio-atlantica si allontanano fra loro a velocità minori, circa 30 millimetri l'anno. A causa di queste differenze nella velocità di espansione e nella quantità di magma che risale in corrispondenza delle dorsali, la topografia delle dorsali a espansione veloce differisce da quella delle dorsali a espansione lenta. La cresta di una dorsale a espansione veloce è caratterizzata da un rigonfiamento della crosta oceanica alto diverse centinaia di metri e ampio 5-20 chilometri; invece l'asse di una dorsale a espansione lenta è caratterizzato da una fossa tettonica profonda alcuni chilometri e ampia 20-30 chilometri.

Nei primi anni ottanta, basandosi su osservazioni compiute lungo la Dorsale medio-atlantica, Hans Schouten della Woods Hole Oceanographic Institution, Kim D. Klitgord dello US Geological Survey e i loro collaboratori proposero che le faglie trasformi separassero la Dorsale medio-oceanica in segmenti dal comportamento reciproco indipendente. Suggerirono inoltre che ciascun segmento in espansione fosse connesso a una «sorgente» situata in profondità nel mantello. I loro dati indicavano che ogni segmento è lungo circa 50 chilometri e che le sorgenti e i segmenti di dorsale a esse associati rimangono invariati per decine di milioni di anni.

Quando, insieme a Lonsdale, cartografammo nel 1982 vaste porzioni dell'asse della Dorsale del Pacifico orientale, ci aspettavamo di trovare una struttura piuttosto continua, poiché erano state scoperte solo nove faglie trasformi ampiamente spaziate lungo i 5000 chilometri della dorsale. Fu quindi una sorpresa trovare l'asse della dorsale frequentemente interrotto da numerose piccole dislocazioni (finora ne sono state cartografate più di 40). Queste discontinuità spezzavano la dorsale in segmenti di lunghezza compresa tra i 10 e i 200 chilometri. A differenza delle faglie trasformi, queste dislocazioni erano caratterizzate da un affiancamento delle estremità della dorsale e non presentavano una faglia chiaramente definita che connettesse le estremità (*si veda l'illustrazione a pagina 26*). Dall'epoca di questa scoperta abbiamo cartografato le regioni fuori asse intorno a queste dislocazioni in zona di dorsali affiancate, ap-

La Dorsale del Pacifico orientale si forma dove la zolla del Pacifico e quella delle Cocos si allontanano. Qui ne è rappresentato un tratto di 1000 chilometri fra 8 e 17 gradi di latitudine nord. Si notano due tipi di discontinuità: grandi faglie trasformi di circa 100 chilometri e dislocazioni più piccole di circa 10 chilometri, i centri di espansione su dorsali affiancate. La profondità va da 2350 (*in rosa*) a 3500 metri (*in blu scuro*).

prendendo che le strutture hanno una rapida evoluzione. Oltre a ciò abbiamo scoperto che le discontinuità possono migrare lungo la dorsale a velocità variabile e in varie direzioni: i singoli segmenti delimitati da queste discontinuità possono evidentemente allungarsi o accorciarsi. In seguito mappe ad alta risoluzione hanno documentato analoghe discontinuità non fisse anche lungo la Dorsale medio-atlantica caratterizzata da espansione lenta.

Le discontinuità della Dorsale medio-oceanica possono essere classificate secondo forma e dimensioni. Per un centro a rapida espansione come la Dorsale del Pacifico orientale, una discontinuità del primo ordine (*a*) è una faglia trasforme, dove le zolle rigide scorrono l'una rispetto all'altra. Questa faglia disloca la dorsale di almeno 50 chilometri. Una discontinuità del secondo ordine (*b*) è generalmente un grande centro di espansione in zona di dorsali affiancate che disloca la Dorsale del Pacifico orientale di almeno due chilometri. Una discontinuità del terzo ordine (*c*) è un piccolo centro di espansione in zona di dorsali affiancate che disloca la Dorsale del Pacifico orientale di 0,5-2 chilometri. Una discontinuità del quarto ordine (*c*) è caratterizzata da leggere deviazioni dalla linearità assiale (DEVAL). Anche per un centro a espansione lenta, come la Dorsale medio-atlantica, una discontinuità del primo ordine (*d*) è una faglia trasforme, ma rappresenta un'interruzione della fossa tettonica e non della cresta di dorsale. Una discontinuità del secondo ordine (*e*) è una irregolarità nella fossa tettonica. Una discontinuità del terzo ordine (*f*) è una interruzione fra catene di vulcani, mentre una discontinuità del quarto ordine (*f*) è una piccola interruzione all'interno di una catena di vulcani. Le discontinuità del primo e del secondo ordine sono di solito accompagnate da crosta distorta formatasi all'evolversi della discontinuità. Le discontinuità del primo e del secondo ordine durano più a lungo di quelle del terzo e del quarto ordine; la crosta oceanica vicino a queste non mostra infatti segni di distorsione.

Un modello di rifornimento magmatico

Per determinare l'origine di queste discontinuità, tentammo insieme ai nostri colleghi di trovare connessioni fra la segmentazione e l'attività vulcanica. Sebbene il vulcanismo possa essere molto diverso da un segmento all'altro, varia senz'altro sistematicamente lungo lo stesso segmento. Le regioni meno attive sono le discontinuità profonde, mentre quelle più attive sono le zone centrali più superficiali dei segmenti.

Partendo da queste e da altre osservazioni, sviluppammo con Schouten e i nostri colleghi un modello di rifornimento magmatico per spiegare la segmentazione della dorsale. Nel mantello, a profondità comprese fra 30 e 60 chilometri, le rocce sono soggette ad alte temperature, ma restano allo stato solido per le pressioni elevate a cui sono in genere sottoposte. L'ambiente è però differente in corrispondenza dei margini tra le zolle tettoniche. Via via che le zolle si separano, una parte della roccia viene decompressa e fonde. La roccia fusa allora si infiltra verso l'alto attraverso il mantello e riempie una camera poco profonda nella crosta al di sotto della cresta della dorsale. Quando la camera si gonfia a causa del magma e comincia a espandersi, la cresta della dorsale può venire sollevata dalla spinta idrostatica esercitata sia dalla roccia fusa della camera magmatica sia dalla più vasta regione di roccia calda nel mantello superiore (*si veda l'illustrazione a pagina 28*).

Secondo il modello di rifornimento magmatico, maggiore è l'afflusso di roccia fusa e calda a una regione, maggiore è il sollevamento del sovrastante segmento di dorsale. Inoltre la velocità e l'entità dell'afflusso di roccia fusa può cambiare da regione a regione, dando luogo a variazioni nella morfologia dei diversi segmenti sovrastanti.

Il modello di rifornimento magmatico spiega anche variazioni strutturali più piccole. Quando il magma contenuto nelle camere migra lateralmente lungo l'asse della dorsale, la crosta sottile e rigida al di sopra della camera magmatica si stira e si frattura. Il magma può eruttare sul fondo oceanico attraverso queste fratture. Mentre le spaccature crescono, si hanno eruzioni vulcaniche che continuano fino a che la produzione di magma diminuisce e ne cessa il rifornimento. Le variazioni temporali nell'afflusso del magma influenzano l'evoluzione di un segmento: quando esso è ben rifornito di roccia fusa rispetto a quelli adiacenti tende ad allungarsi, mentre tende ad accorciarsi se è poco rifornito. È proprio questa crescita e contrazione del sistema di rifornimento magmatico, in risposta al moto di separazione delle zolle, a causare l'allungamento o l'accorciamento dei segmenti e la migrazione delle piccole discontinuità.

Il modello di rifornimento magmatico sembra accordarsi con le misurazioni sismiche e gravimetriche relative alla Dorsale del Pacifico orientale. I dati sismici rivelano l'esistenza di un buon riflettore di energia sonora alla profondità di 1200-2500 metri al di sotto delle porzioni superficiali di ciascun segmento di dorsale. Questo riflettore spesso scende a maggiori profondità e poi scompare presso le discontinuità. Nel 1987 Robert S. Detrick e collaboratori dell'Università del Rhode Island proposero che il riflettore fosse il tetto di una camera magmatica. L'intensità della riflessione sonora può essere spiegata dalla presenza di una sottile calotta di roccia fusa quasi al 100 per cento alla sommità della camera.

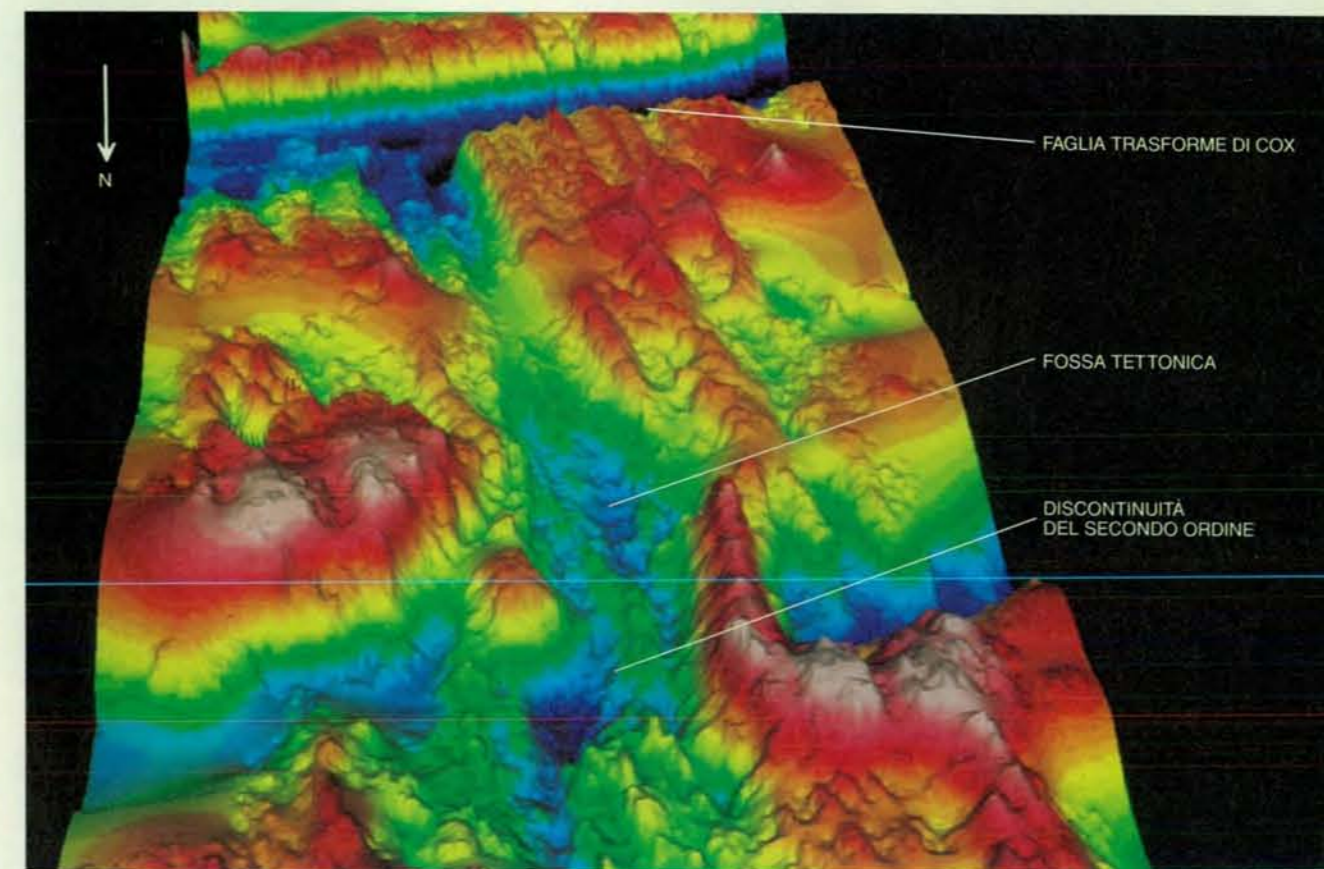
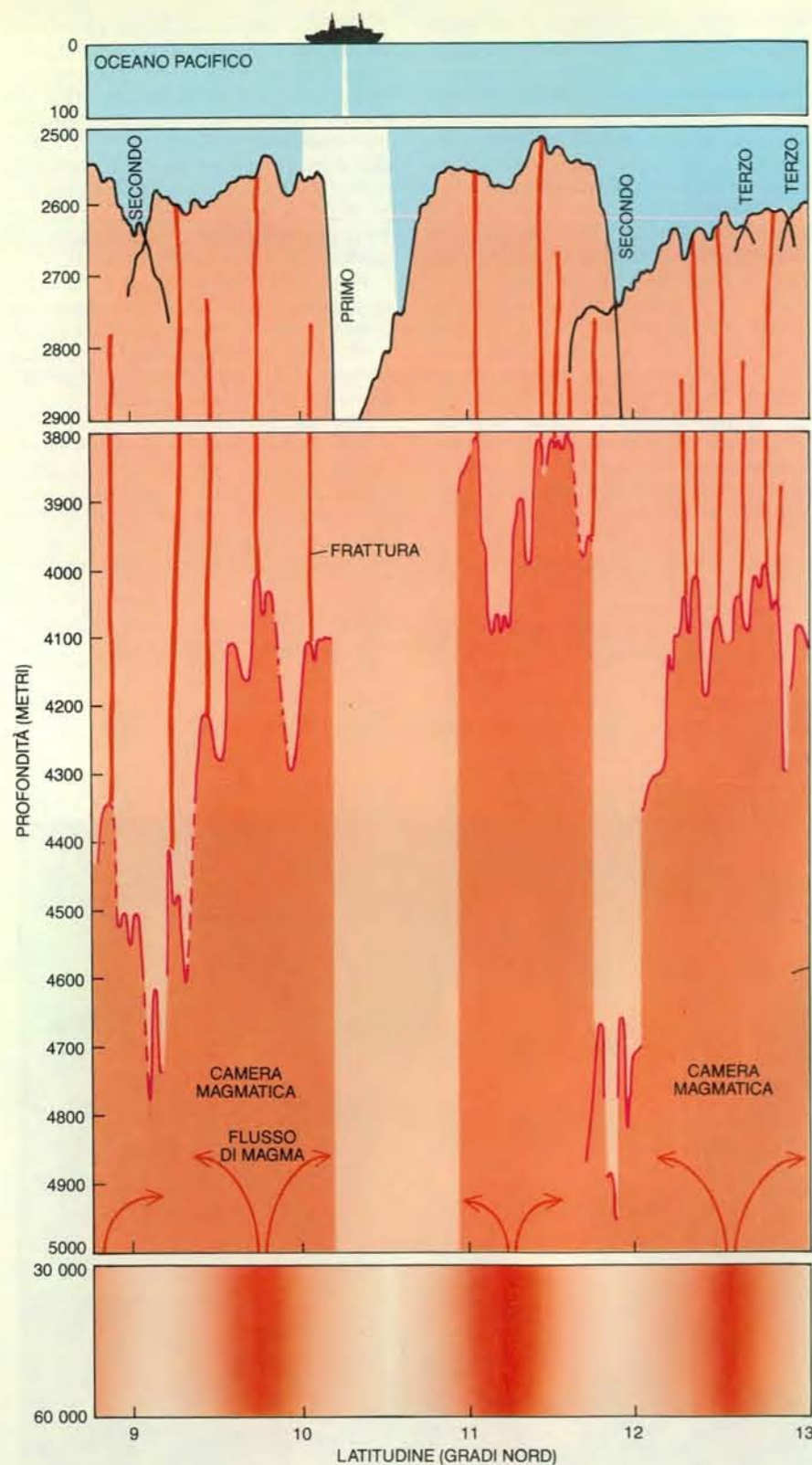
La maggior parte dei geologi e oceanografi ritiene oggi che il riflettore sia un corpo magmatico lungo e poco profondo situato sotto la dorsale e circondato da roccia calda. John A. Orcutt e colleghi della Scripps Institution hanno effettuato rilevamenti sismici lungo la parte settentrionale della Dorsale del Pacifico orientale; dai dati si può dedurre che questa camera di roccia fusa sia ampia solo da due a quattro chilometri e profonda meno di un chilometro. La camera magmatica è circondata da una regione più vasta di roccia molto calda (forse leggermente fusa). L'intero serbatoio magmatico può essere ampio da sei a dieci chilometri e profondo da tre a sei chilometri. Questa regione di roccia calda si estende almeno fino alla base della crosta oceanica e probabilmente, per alcuni chilometri, nel mantello superiore (*si veda l'illustrazione a pagina 31*).

La presenza di camere magmatiche e di serbatoi di roccia calda sarebbe confermata anche da precise misurazioni del campo gravitazionale effettuate localmente, che indicano la presenza di una massa galleggiante al di sotto dell'asse della dorsale. Dalle misurazioni sismiche e gravimetriche gli studiosi hanno dedotto che la camera magmatica ha una sezione trasversale a forma di fungo con un esile gambo di roccia in parte fusa che alimenta una lente ampia ma molto sottile di roccia completamente fusa.

I dati sismici non dimostrano con certezza che esistano camere magmatiche sotto formazioni a espansione lenta come la Dorsale medio-atlantica. Altre misurazioni sembrano però comprovare il modello di rifornimento magmatico per le dorsali a espansione lenta. Donald W. Forsyth e Ban-Yuen Kuo della Brown University e Jian Lin e G. Michael Purdy di Woods Hole hanno scoperto anomalie del campo gravitazionale centrate sulle porzioni più superficiali di diversi segmenti della Dorsale medio-atlantica. La migliore spiegazione di queste anomalie va vista in una risalita di materiale caldo dal mantello o nell'ispessimento della crosta oceanica sotto le porzioni più superficiali di ciascun segmento. Entrambe le interpretazioni si conciliano con il modello di rifornimento magmatico.

Fu un grande sollievo apprendere che le misurazioni sismiche e gravimetriche comprovavano, almeno in senso generale, il modello di rifornimento magmatico per spiegare la segmentazione. Noi e altri studiosi di tettonica e geochimica avevamo del resto rischiato alquanto con questa ipotesi. È vero che alcuni di noi pensavano a una camera più vasta; resta inoltre da vedere se il magma scorra davvero lateralmente sotto l'asse della dorsale, ma sono comunque stati trovati dati significativi a sostegno del modello.

Discontinuità

Il modello di rifornimento magmatico spiega bene i molti tipi di discontinuità e di segmenti. Queste strutture sono dette

La Dorsale medio-atlantica emerge dove le zolle sudamericana e africana si separano «lentamente» alla velocità di circa 35 millimetri all'anno. L'asse della dorsale è segnato da una fossa tettonica profonda 2000 metri, struttura tipica di quasi tutte le dorsali a lenta espansione. La mappa evidenzia una irregolarità di 12 chilometri nella fossa, una discontinuità del secondo ordine e una discontinuità del primo ordine, la faglia trasforme di Cox. I colori indicano le profondità da 1900 metri (*in rosa*) a 4200 metri (*in blu scuro*).

Il magma risale infiltrandosi dalle profondità del mantello e forma la Dorsale del Pacifico orientale (qui in sezione lungo la cresta). Secondo alcuni studiosi, roccia parzialmente fusa proveniente da profondità comprese tra 30 000 e 60 000 metri filtrerebbe verso l'alto e sarebbe prodotta più in certe aree (*in rosso scuro*) che non in altre (*in rosso chiaro*). La roccia fusa riempirebbe e farebbe espandere le camere magmatiche. I rilevamenti sismici fanno pensare che le sommità delle camere magmatiche si trovino alle profondità indicate dalla linea rossa tratteggiata. La roccia fusa risale dalla camera magmatica attraverso fratture nella crosta, per poi solidificare o eruttare sul fondo oceanico. La profondità della dorsale (*profilo nero in alto*) è stata determinata con rilevamenti sonar. La camera si interrompe al di sotto di discontinuità del primo, del secondo e a volte del terzo ordine.

di primo, secondo, terzo o quarto ordine secondo le dimensioni, la longevità, la geometria e il comportamento. Si è dimostrato che le strutture di primo, secondo e terzo ordine sono componenti fondamentali delle dorsali sia a lenta sia a rapida espansione. (Il ruolo delle strutture di quarto ordine è tuttora un problema insoluto.) Poiché queste strutture sono state studiate più in dettaglio nelle dorsali a rapida espansione, le descriveremo prima in questo contesto.

Il tipo più comune di discontinuità del primo ordine è la faglia trasforme, che compare laddove le zolle rigide scorrono l'una rispetto all'altra. Le discontinuità del primo ordine dislocano i segmenti di dorsale di almeno 20 chilometri, e in genere di oltre 50 chilometri. Quindi la grandezza della maggior parte delle faglie trasformi era tale da consentirne l'individuazione già con i primi tentativi di rilevamento. Queste discontinuità definiscono tipicamente segmenti lunghi da 200 a 800 chilometri.

Sul fondo oceanico le faglie trasformi appaiono come bande strette e diritte che collegano le estremità dei segmenti. Queste bande possono proseguire nei fianchi di una dorsale per centinaia o migliaia di chilometri, indicando quindi che le strutture di primo ordine persistono per milioni o decine di milioni di anni.

Un segmento del primo ordine può essere interrotto da diverse discontinuità del secondo ordine, distanziate in genere fra loro di 50-300 chilometri. Tuttavia, a differenza delle strutture del primo ordine, i segmenti del secondo ordine non sono rigidi, e il loro moto non è concentrato lungo una stretta zona di faglia. Le discontinuità del secondo ordine sono complesse e caratterizzate da strutture oblique e affiancate.

L'aspetto di questo tipo di discontinuità fa pensare alle braccia di due persone che stanno per stringersi la mano. Le braccia (dorsali) sono estese in modo tale che le mani (le estremità curve delle dorsali) si sovrappongano. La distanza fra le «mani» varia da uno a 20 chilometri e la dislocazione è tipicamente tre volte più piccola dell'entità dell'affiancamento delle due dorsali. Una struttura simile è chiamata centro di espansione in zona di dorsali affiancate (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

Quando nel 1982 venne scoperto questo tipo di centro di espansione, non potevamo spiegarci molte delle sue caratteristiche. Perché, per esempio, tanti centri hanno un rapporto fra affiancamento e dislocazione di 3 a 1? Che cosa succede alla crosta situata fra le dorsali affiancate? Perché le dorsali hanno un andamento nettamente curvo?

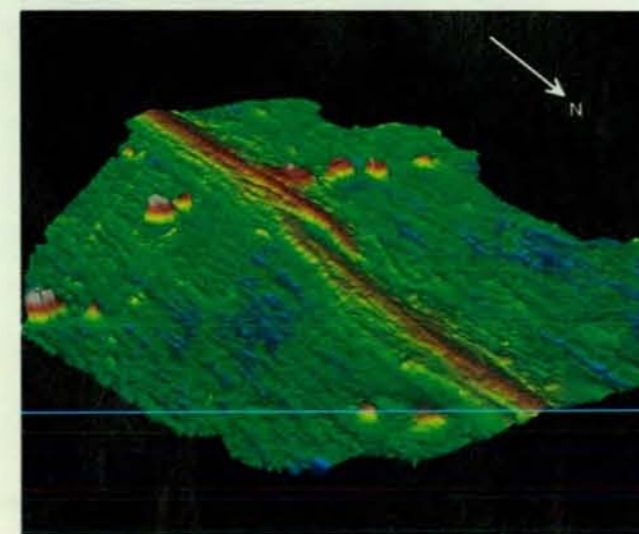
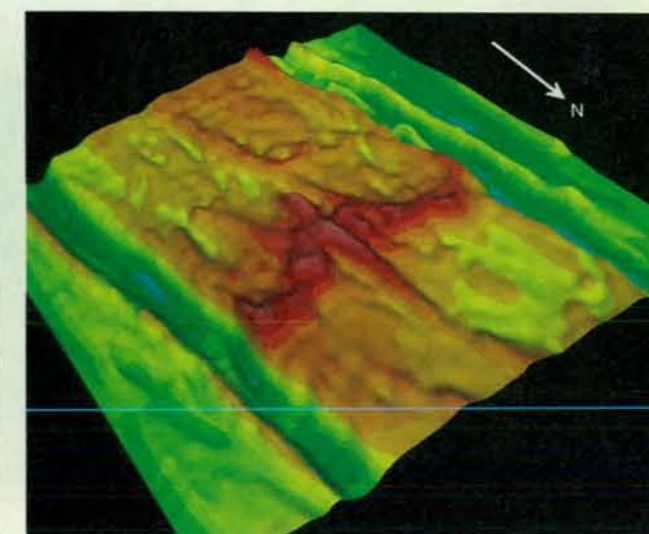
Nel 1984 David D. Pollard della Stanford University, Jean-Christophe Sempere, allora all'Università della California a Santa Barbara, e uno di noi (Macdonald) trovarono che la forma tanto ripetitiva dei centri di espansione in zona di dorsali affiancate poteva essere spiegata con il modo in cui le spaccature si sviluppano e si propagano lungo le dorsali. Quando le zolle si separano, si formano spaccature perpendicolari alla direzione della sollecitazione. Al centro di un segmento la direzione della sollecitazione è in genere perpendicolare all'asse della dorsale, cosicché le spaccature si allungano parallelamente alla dorsale. Nella regione dei segmenti affiancati, però, la direzione della sollecitazione può variare. Quando una spaccatura, dal centro di un segmento, comincia a espandersi verso la regione di affiancamento dapprima devia in direzione opposta alla regione, e quindi si incurva verso di essa (*si veda l'illustrazione a pagina 30*). La spaccatura permette al magma di fuoriuscire sul fondo oceanico, formando una nuova estremità di dorsale. Ma una volta che l'affiancamento delle spaccature ha raggiunto una distanza che corrisponde a circa tre volte la lunghezza della dislocazione, la propagazione della spaccatura si interrompe improvvisamente. Ben presto comincia a svilupparsi una nuova spaccatura dietro la prima. Mentre si sviluppa la seconda, la prima estremità della dorsale si perde allontanandosi lateralmente a causa della separazione delle zolle.

Strutture fuori asse

I centri di espansione con un affiancamento di più di alcuni chilometri lasciano in genere «scie» di crosta oceanica deformata larghe anche 80 chilometri. Il fondo oceanico in questa regione disturbata, detta anche «zona discordante», è più profondo di 100-300 metri rispetto al fondo oceanico circostante; quindi i centri di espansione in zona di dorsali affiancate si trovano 100-300 metri più in basso delle porzioni superficiali, magmaticamente vivaci, dei segmenti di dorsale. Queste caratteristiche sono emerse da mappe realizzate in diverse campagne di rilevamento condotte sui fianchi della Dorsale del Pacifico orientale. Le mappe delle zone discordanti mostrano anche estremità fossili di dorsali che sono incurvate e si allungano per 10-40 chilometri. Queste estremità sono state tagliate fuori in corrispondenza di centri di espansione in zona di dorsali affiancate.

Il modello di rifornimento magmatico sembra spiegare la struttura dei centri di espansione in zona di dorsali affiancate. Pare che questi si trovino alle estremità delle sorgenti magmatiche e che tendano a essere impoveriti di magma. Se ciò è vero, la crosta che si crea in corrispondenza di questi centri di espansione può essere anche del 50 per cento più sottile della crosta, spessa 6 chilometri, situata presso il centro dei segmenti. Per verificare questa ipotesi occorrono rilevamenti sismici e gravimetrici di dettaglio.

Le misurazioni del campo magnetico terrestre in corrispondenza dei centri di espansione in zona di dorsali affiancate confermano l'ipotesi che questi centri si creino dove il rifornimento di magma è scarso. La lava che erutta da piccole camere magmatiche, che solidificano e si riempiono in alternanza, tende a contenere più minerali ricchi di ferro in uno stato altamente magnetizzato. Invece le camere magmatiche abbastanza grandi da restare fuse nell'intervallo tra due episodi di riempimento producono lava magneticamente debole. Poiché la roccia vicino ai centri di espansione in zona di dorsali affiancate è spesso molto più magnetizzata di quella situata lungo il resto della dorsale, è probabile che questi centri siano alimentati in modo discontinuo da sacche isolate di magma.

Basandosi sull'età della crosta in cui si estendono le zone discordanti e sulle caratteristiche delle strutture fuori asse, Laura J. Perram, Suzanne M. Carbotte e Marie-Helene Cormier dell'Università della California a Santa Barbara hanno dimostrato che i segmenti del secondo ordine persistono come entità distinte anche per diversi milioni di anni. La posizione delle discontinuità può oscillare lentamente sulla dorsale di 10-20 chilometri, o può migrare lungo di essa per molte decine di chilometri a velocità comprese tra i 20 e i 100 millimetri all'anno. Una discontinuità tende a muoversi a scatti; un segmento di dorsale può allungarsi alla velocità di diverse centinaia di millimetri all'anno, per poi ritirarsi e accorciarsi per un certo periodo

Si è compiuto il rilevamento di un centro di espansione in zona di dorsali affiancate che taglia trasversalmente la Dorsale del Pacifico orientale a circa 12 gradi di latitudine nord per determinarne la topografia (*a sinistra*) e la magnetizzazione (*a destra*). La carta topografica mostra come il centro di espansione dislochi la Dorsale del Pacifico orientale di otto chilometri. I colori indicano profondità da 2350 (*in rosa*) a 3500 metri (*in blu scuro*). I bracci della discontinuità si affiancano per 27 chilometri; essi si stringono e si approfondiscono vicino alla discontinuità, forse perché l'apporto di magma nella regione è scarso. Il fondo oceanico nei pressi della discontinuità - la cosiddetta «scia» - è insolitamente profondo e caratterizzato da estremità di dorsale sparse, soprattutto sul lato occidentale. Ne deriva che le regioni non ben rifornite di magma sono fortemente magnetizzate. Nella mappa qui sopra la magnetizzazione diminuisce d'intensità dalle zone in rosso a quelle in giallo. La scia del centro di espansione su dorsali affiancate è in rosso. I solchi verdi si formarono 700 000 anni fa, durante l'inversione di polarità del campo magnetico terrestre. La scia mostra che il centro di espansione su dorsali affiancate si formò circa 700 000 anni fa, migrò verso nord per un breve tratto e poi si mosse lentamente verso sud alla velocità di 70 millimetri all'anno. Negli ultimi 200 000 anni la velocità di migrazione verso sud è arrivata a 200 millimetri all'anno.

prima di un successivo scatto. In questo modo le estremità della dorsale in corrispondenza di una discontinuità del secondo ordine sembrano impegnate in un duello con scatti avanti e indietro lungo la dorsale e progrediscono lentamente in una direzione o nell'altra.

Piccole sovrapposizioni e deviazioni assiali

Lungo la Dorsale del Pacifico orientale, le discontinuità del terzo ordine consistono di solito in centri di espansione in zona di dorsali affiancate che dislocano la dorsale di meno di tre chilometri; i segmenti definiti da discontinuità del terzo ordine sono lunghi da 30 a 100 chilometri. Si è visto che le discontinuità del terzo ordine corrispondono a interruzioni nelle camere magmatiche.

I segmenti di dorsale definiti da discontinuità del terzo ordine lasciano scarsa, o nessuna, traccia di scie fuori asse. Poiché lasciano deboli segni nella vecchia crosta oceanica sui fianchi della dorsale, possiamo concludere che queste discontinuità sono, geologicamente, di breve vita. Stimiamo infatti che abbiano meno di 10 000 anni, cioè il tempo che una dorsale a rapida espansione impiega a produrre due chilometri di crosta.

Le discontinuità del quarto ordine sono lievi curvature o piccole dislocazioni inferiori a 500 metri: queste strutture sono spesso chiamate DEVAL (da *Deviation in Axial Linearity*). In genere le DEVAL sono distanziate fra loro di 10-40 chilometri. Una DEVAL può costituire la manifestazione di una singola grande eruzione, e quindi essere giovane: può avere solo centinaia o migliaia di anni.

Le DEVAL sono molto difficili da scoprire: possono a stento essere rilevate con sistemi sonar come il SeaBeam, e neanche i rilevamenti sismici sono di grande aiuto. In alcuni casi le camere magmatiche al di sotto di una DEVAL appaiono leggermente più profonde e, in rare occasioni, mostrano un'interruzione; tuttavia nella maggior parte dei casi le camere sotto le discontinuità del quarto ordine sono piuttosto continue. Durante la crociera del 1982 Fox comunicò a Macdonald di aver trovato diverse DEVAL nelle mappe del SeaBeam. Ma questo poteva dipendere - come l'altro gli fece notare - dal fatto di avere guardato le mappe troppo da vicino e su una nave in rollio: ci rendemmo conto allora che avremmo dovuto focalizzare la nostra attenzione su dislocazioni più grandi se volevamo essere presi sul serio.

In effetti i segmenti del quarto ordine (le sezioni di dorsale delimitate da DEVAL) furono riconosciuti come strutture distinte e importanti solo nel 1986, quando Charles H. Langmuir del Lamont-Doherty Geological Observatory, John F. Bender dell'Università del North Carolina a Charlotte e colleghi analizzarono la geochimica di un tratto di 500 chilometri della Dorsale del Pacifico orientale. Essi raccolsero campioni di roccia in punti precisi del fondo oceanico per verificare se la segmentazione strutturale potesse essere associata a variazioni nella composizione chimica delle rocce e trovarono che le rocce all'interno di ciascun segmento del quarto ordine avevano composizione simile, mentre quelle di segmenti diversi possedevano caratteristiche chimiche differenti. Questi studi hanno chiarito la natura fondamentale della segmentazione su varie scale e hanno aiutato a identificare altre DEVAL.

Perché le DEVAL hanno composizione chimica diversa? Secondo una teoria, piccoli sbarramenti dividerebbero la camera magmatica al di sotto di segmenti adiacenti del quarto ordine e queste divisioni impedirebbero il mescolamento del magma nelle camere. Tuttavia solo alcune di queste interruzioni sono state rilevate nelle camere magmatiche al di sotto di DEVAL. Un'altra teoria propone che piccole quantità di roccia fusa provenienti da sorgenti isolate del mantello superiore vengano iniettate localmente in una camera magmatica e fuoriescano sul fondo oceanico prima che si abbia un mescolamento. Questo processo darebbe origine a un segmento del quarto ordine con rocce caratterizzate da un chimismo particolare. Occorrono però altri studi per verificare queste idee.

Insieme con la Carbotte e con Nancy R. Grindlay dell'Università del Rhode Island, abbiamo documentato diversi tipi di discontinuità del primo, secondo e terzo ordine lungo dorsali a lenta espansione nell'Atlantico meridionale. Come le loro controparti sulle dorsali a espansione rapida, le discontinuità del primo ordine sulle dorsali a espansione lenta sono faglie trasformi. Le discontinuità del secondo ordine sulle dorsali a espansione lenta sono definite da un gradino laterale della fossa tettonica o da un profondo bacino obliquo lungo cui sono collegate le fosse dislocate. Le discontinuità del secondo ordine permangono per milioni di anni, in media più a lungo rispetto alle discontinuità del secondo ordine in corrispondenza dei centri a rapida espansione. Inoltre le discontinuità del secondo ordine nei centri a espansione lenta migrano più lentamente lungo l'asse della dorsale rispetto alle loro controparti a rapida espansione. Le discontinuità del terzo ordine nei centri a espansione lenta sono costituite da piccole dislocazioni in lunghe catene vulcaniche sul fondo della fossa, mentre le discontinuità del quarto ordine possono essere piccole lacune tra i vulcani.

Vita acquatica e segmentazione

Gli studiosi di oceanografia, tettonica e geochimica hanno appena iniziato a capire alcune delle implicazioni della segmentazione, sia per le dorsali a espansione lenta sia per quelle a espansione rapida. Abbiamo trovato chiari esempi di strutture del primo, secondo, terzo e quarto ordine. Ma i segmenti evolvono dal quarto al primo ordine e viceversa? Sappiamo che la segmentazione è un processo fondamentale che dura da almeno 100 milioni di anni. È possibile che essa abbia svolto un ruolo importante per un periodo molto più lungo? Gli studiosi hanno esaminato peculiari comunità faunistiche sviluppatesi presso sorgenti termali sulla Dorsale medio-oceanica. La sopravvivenza e la migrazione di queste comunità sono forse legate alla longevità di un dato segmento?

Queste domande saranno il punto focale di un futuro programma di ricerca chiamato «Ridge Interdisciplinary Global Experiments» (RIDGE). Fra i molti scopi del programma vi è la mappatura dell'asse e dei fianchi dell'intera Dorsale medio-oceanica e la produzione di immagini più dettagliate delle strutture fuori asse. Geologi e oceanografi hanno a tutt'oggi cartografato meno del 5 per cento del fondo oceanico: oltre metà della crosta terrestre attende ancora di essere esplorata.

Le strutture fuori asse sono prodotte da un centro di espansione in zona di dorsali affiancate, come si vede nel grafico (*in alto*) e nella mappa (*in basso*). Un particolare centro di espansione si riscontra là dove due tratti di dorsale si affiancano (*1*). A sud dell'estremità della dorsale orientale si propaga una frattura (*2*), cosicché roccia fusa può salire in superficie e formare una nuova estremità. Questa si allunga fino ad affiancarsi alla dorsale occidentale per un tratto pari a tre volte la distanza che separa le due dorsali (*3*). Via via che i due bracci si separano, l'estremità originaria della dorsale orientale viene tagliata fuori e si allontana (*4*). Comincia poi a formarsi una nuova estremità occidentale (*5*). Dopo molti episodi di formazione e migrazione di estremità di dorsale (*6*), le strutture fuori asse presentano una migrazione complessiva verso sud. La mappa ad alta risoluzione mostra un centro di espansione in zona di dorsali affiancate che disloca di 12 chilometri la Dorsale del Pacifico orientale. La discontinuità ha avuto un'evoluzione complessa negli ultimi due milioni di anni. La velocità di migrazione ha superato i 200 millimetri all'anno, ma le estremità della dorsale settentrionale e di quella meridionale sono andate avanti e indietro e la velocità di migrazione effettiva verso sud è stata in media di 20 millimetri l'anno. Nella scia sul fondo oceanico, insolitamente profondo, si notano molte estremità di dorsale abbandonate, su entrambi i lati del centro di espansione in zona di dorsali affiancate. La struttura del fondo è fortemente disturbata per una striscia di 80 chilometri adiacente alla discontinuità. I colori indicano profondità di 2350 metri (*in rosa*), 2900 metri (*in giallo*) e 3500 metri (*in blu scuro*).

Si pensa che una camera magmatica (formata da una lente di roccia in gran parte fusa) si estenda al di sotto delle dorsali a rapida espansione. La camera è situata al di sopra di un serbatoio di roccia parzialmente fusa. Camera e serbatoio sono piccoli e scarsamente riforniti di roccia fusa nei pressi di una discontinuità (*regione profonda in primo piano*), ma possono essere grandi e ben riforniti a una certa distanza dalla discontinuità (*nello sfondo*).

BIBLIOGRAFIA

BONATTI ENRICO e CRANE KATHLEEN, *Zone di frattura oceaniche* in «Le Scienze» n. 191, luglio 1984.

HAYMON RACHEL M. e MACDONALD KEN C., *The Geology of Deep-Sea Hot Springs* in «American Scientist», 73, n. 5, settembre/ottobre 1985.

SCHOUTEN HANS, KLITGORD KIM D. e WHITEHEAD JOHN A., *Segmentation of Mid-Ocean Ridges* in «Nature», 317, n. 6034, 19 settembre 1985.

LANGMUIR CHARLES H., BENDER JOHN F. e BATIZA RODEY, *Petrological and Tectonic Segmentation of the East Pacific Rise, 5° 30'-14° 30'N* in «Nature», 322, n. 6078, 31 luglio 1986.

DETRICK R. S., BUHL P., VERA E., MUTTER J., ORCUTT J., MADSEN J. e BROCHER T., *Multi-Channel Seismic Imaging of a Crustal Magma Chamber along the East Pacific Rise* in «Nature», 326, n. 6108, 5 marzo 1987.

MACDONALD K. C., FOX P. J., PERRAM L. J. e altri, *A New View of the Mid-Ocean Ridge from the Behaviour of Ridge-Axis Discontinuities* in «Nature», 335, n. 6187, 15 settembre 1988.

Le lagune costiere

Occupano il 13 per cento delle coste e sono tra i più produttivi ecosistemi della biosfera; solo di recente, tuttavia, ne è stata rivalutata l'originalità biologica e ne sono stati compresi i meccanismi di funzionamento

di Giovanni Carrada

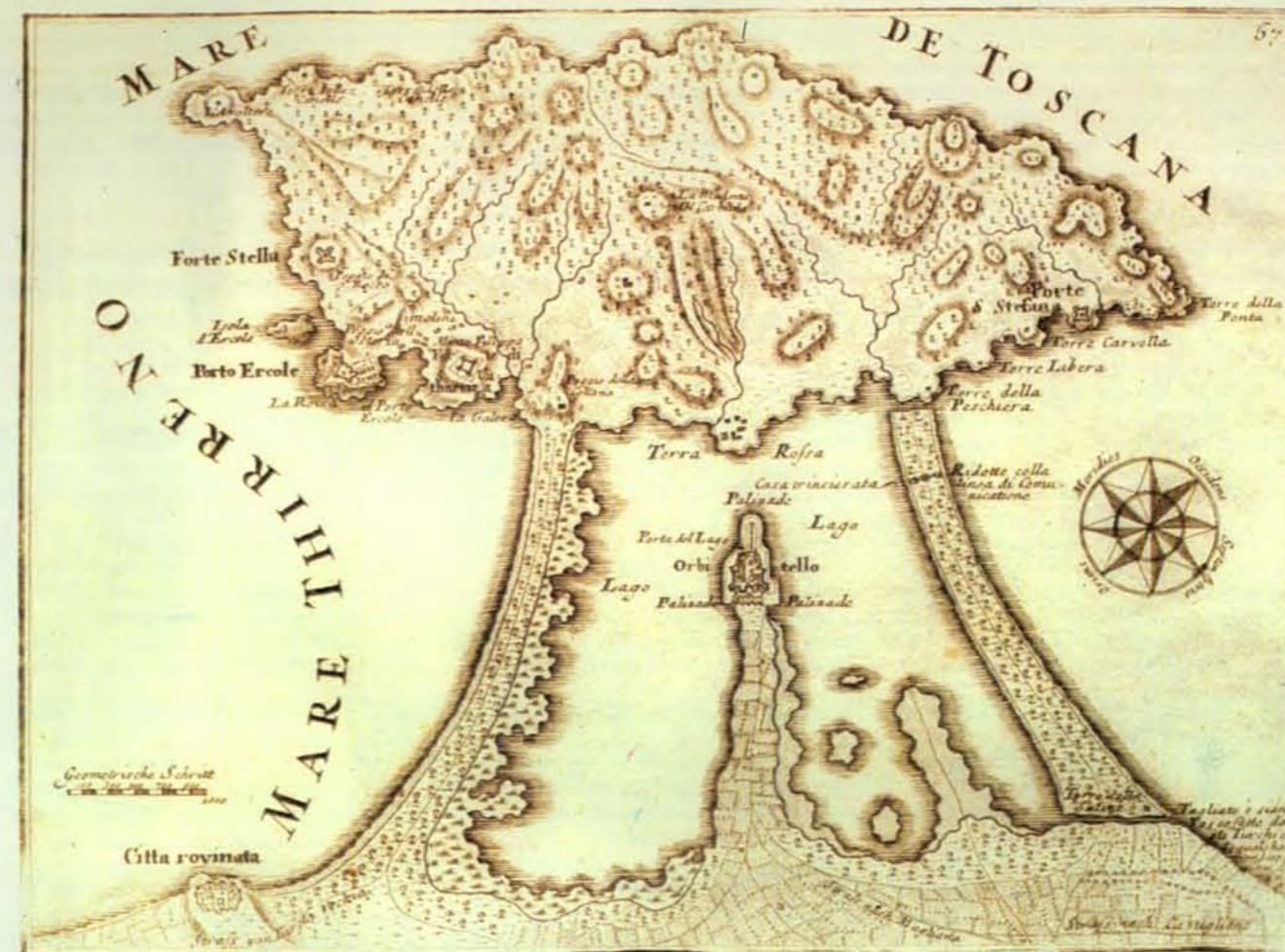
Punti di incontro non solo geografico, ma anche biologico tra terra e mare, le lagune sono tra gli ambienti più giovani ed effimeri del paesaggio costiero. Comune denominatore del grande assortimento di forme che possono presentare è il fatto di essere bacini a salinità variabile, poco profondi, racchiusi tra la terraferma e barriere di sabbia e piccoli ciottoli, generalmente parallele alla costa. Le comunicazioni con il mare sono assicurate da varchi nelle barriere mantenuti aperti dalle correnti di marea.

I sistemi lagunari occupano il 13 per cento dello sviluppo costiero mondiale. Si trovano lungo le coste basse di tutti i continenti, ma i più vasti sono concentrati lungo le sponde atlantiche dell'America Settentrionale e Meridionale e dell'Africa e lungo le coste dell'Asia orientale e sudorientale. Le loro dimensioni vanno da pochi ettari ai 973 000 di un vero e proprio «mare interno» come la Lagoa dos Patos, in Brasile.

Eppure le lagune costiere sono uno degli ambienti marini il cui studio scientifico è iniziato più tardi. Il primo volume in lingua inglese a esse espressamente dedicato è apparso solo nel 1980.

Le acque racchiuse tra la barriera e la terraferma sono relativamente isolate dal mare, con cui comunicano solo attraverso canali. L'assenza di correnti importanti fa in modo che i sedimenti in sospensione, di origine sia terrestre sia marina, vi si depositino rapidamente, dando origine a fondali fangosi.

Le barriere oggi esistenti hanno cominciato ad assumere l'attuale profilo circa 6000 anni fa, alla fine del periodo di trasgressione marina che fece seguito al termine dell'ultima glaciazione. A quell'epoca le correnti litorali iniziarono ad accumulare a una certa distanza dalla costa, dove le onde in arrivo cominciano a frangersi, una grande quantità di sedimenti incoerenti, parte dei quali provenivano da precedenti barriere lagunari sommerse al momento della trasgressione marina. Oggi le barriere lagunari sembrano aver raggiunto un «profilo di equilibrio» tra erosione e deposizione dei sedimenti, segno di una diminuita disponibilità di questi ultimi. Fanno eccezione alcune zone costiere nei pressi delle foci di grandi fiumi, che continuano a essere rifornite di nuovi sedimenti. In generale però la formazione delle attuali barriere sembra essere stata un evento limitato a quel periodo e destinato a non ripetersi almeno fino al prossimo importante cambiamento del livello del mare.

La laguna di Venezia, qui ripresa dall'alto, è la più famosa e meglio conosciuta anche dal punto di vista scientifico. La sua integrità biologica, assicurata per millenni dai meccanismi naturali dell'ecosistema lagunare, è oggi compromessa dalle attività umane. (Fotografia Cameraphoto, gentilmente fornita insieme a quella di pagina 37 e a quella di pagina 38 al centro dal Consorzio Venezia Nuova.)

Questa incisione del XVII secolo, tratta da *Curioses Staats und Kriegs Theatrum in Italien*, pubblicato ad Augusta dallo stampatore Gabriel Bodenehr, raffigura la laguna di Orbetello. All'epoca non esisteva la diga che, dal 1842, divide la laguna. Per riportare all'equilibrio questo tratto di costa tirrenica minacciato dall'eutrofizzazione l'Enea sta svolgendo un'accurata ricerca multidisciplinare.

Le lagune sono tra gli ambienti acquatici più complessi e variabili, dotate come sono di estese interfacce con l'ambiente marino e continentale e con l'atmosfera. Poiché il volume delle acque lagunari è ridotto, la loro inerzia chimico-fisica è molto inferiore a quella delle acque marine antistanti; più di queste ultime esse risentono infatti delle condizioni climatiche locali, degli apporti di acqua dolce, dell'attività degli organismi e degli effetti degli interventi umani.

Tutte queste diverse influenze si traducono in un'ampia variabilità dei parametri ambientali, ciascuno dei quali è legato a tutti gli altri mediante rapporti causa-effetto che agiscono in tempi relativamente brevi, anche poche ore. Le variazioni seguono ritmi che possono venire perturbati anche dal semplice prolungarsi di un periodo di buono o di cattivo tempo e che sono legati all'ingresso e all'uscita della marea, all'alternarsi del giorno e della notte e delle stagioni. Di conseguenza le condizioni ambientali reperibili nelle acque lagunari possono essere quanto mai varie, tanto che c'è chi sostiene che esistono tanti ambienti lagunari quante sono le lagune.

La salinità delle acque lagunari, per esempio, dipende molto più sensibilmente di quella delle acque marine dall'evaporazione e dagli apporti di acqua dolce. Dove questi ultimi sono notevoli possono essere alterati anche i rapporti tra gli ioni disciolti, che sono contenuti in quantità molto diverse nei due tipi di acque. In ogni laguna si stabilisce una zonazione orizzontale della salinità, che varia con la stagione e i movimenti delle acque. Le zone situate di fronte alle aperture nella barriera hanno in genere una salinità prossima a quella del mare, mentre quelle più interne presentano una salinità progressivamente minore se vi è arrivo di acqua dolce, o maggiore se l'evaporazione è molto intensa.

Anche la temperatura delle acque è estremamente variabile, perché segue più da vicino le variazioni della temperatura atmosferica. Rispetto alle acque marine, quelle lagunari sono molto più fredde in inverno e più calde in estate.

La concentrazione dell'ossigeno, parametro-chiave nell'ecologia delle lagune, varia non solo al variare degli altri parametri fisici e chimici, in primo luogo la temperatura, ma anche in risposta all'attività fotosintetica delle piante e alla respirazione dell'intera comunità.

La marea è il meccanismo attraverso cui la laguna «respira»; il suo ingresso è

chiamato dagli ecologi, con termine un po' antiquato ma sempre valido, «vivificazione marina». Il parziale ricambio idrico contribuisce a migliorare le condizioni mesologiche delle acque. Ne riduce le variazioni termiche e saline e ne aumenta la trasparenza. Soprattutto nelle ore notturne, quando cessa l'attività fotosintetica delle piante, e durante l'estate, le correnti di marea innalzano la concentrazione dell'ossigeno disciolto. Il ricambio idrico diluisce i cataboliti escreti dagli organismi e le sostanze tossiche prodotte dai batteri anaerobici del sedimento. Insieme con la marea penetrano in laguna le larve planctoniche di specie che si riproducono soltanto in mare e dalle quali dipende una parte importante della comunità.

Nelle lagune scarsamente vivificate delle regioni calde - così come in quelle mediterranee - è relativamente frequente che in estate, a causa dell'eccessivo accumulo di sostanza organica in decomposizione e dell'alta temperatura delle acque, diminuisca fino a scomparire l'ossigeno disciolto, prima nei sedimenti e poi nell'intera colonna d'acqua. Quando questo avviene, si parla di «crisi distrofica»: l'assenza di ossigeno fa sì che l'attività dei batteri anaerobici del fondo liberi grandi quantità di idrogeno solforato, metano e ammoniaca, che avvelenano letteralmente la comunità vivente.

Due aspetti nella vita delle lagune costiere colpiscono in particolar modo l'attenzione di chi è abituato a studiare la vita nel mare o nelle acque continentali. Il primo è il ristretto numero di specie presenti, il secondo l'abbondanza, in certi casi davvero straordinaria, di individui di alcune di esse. La bassissima diversità specifica veniva tradizionalmente spiegata come il prodotto della potente azione selettiva esercitata dai ripidi e variabili gradienti ambientali, e in modo particolare dalle oscillazioni di salinità. Ogni differenza tra la concentrazione dei liquidi interni dell'organismo e quella del mezzo in cui esso vive si traduce in un gradiente di pressione osmotica. In un'acqua salmastra un organismo di acqua dolce tende a perdere acqua, mentre un organismo marino tende ad assorbirne. Invece le specie adattate alla vita negli ambienti a salinità variabile, che vengono chiamate eurialine, sono dotate di meccanismi fisiologici per regolare il contenuto salino dei liquidi interni. Fino a non molto tempo fa si riteneva che la colonizzazione delle lagune fosse limitata a poche specie eurialine marine e d'acqua dolce, distribuite lungo la congiungente mare-acque continentali a seconda delle maggiori o minori capacità osmoregolative di ciascuna.

In mare aperto, come anche nei laghi e nei fiumi, a piccole differenze nell'ambiente chimico-fisico corrispondono differenze anche notevoli nella comunità degli organismi. Tra le lagune invece, anche se caratterizzate da una grande varietà di condizioni mesologiche, esiste una singolare omogeneità sia nel popolamento, sia nei meccanismi di funzionamento dell'ecosistema.

Oggi si ritiene che le comunità lagunari non siano il semplice risultato dell'impoverimento delle vicine comunità marine costiere e di quelle di acqua dolce. Al contrario, si è osservato che esse mostrano aspetti peculiari e una sostanziale unità biologica. Esistono specie vegetali e animali espressamente adattate a questo tipo di ambienti che si sono evolute da forme marine ma che, tuttavia, non si trovano mai in mare aperto. L'ampia valenza ecologica che permette loro di colonizzare le lagune è stata acquisita a spese della capacità competitiva che si manifesta nelle acque a piena salinità. Il premio che hanno ricevuto in cambio è la possibilità di sfruttare le ricche risorse dei nuovi habitat, naturalmente eutrofici, e quindi di costituire popolazioni numerose. Una ulteriore conseguenza della capacità di colonizzare ambienti chimico-fisici molto diversi è la vasta distribuzione geografica della maggior parte di queste specie. Il loro numero ristretto può invece essere semplicemente dovuto alla «giovane» età geologica delle lagune, che non avrebbe dato tempo a un maggior numero di specie di sviluppare adeguate capacità di osmoregolazione, un adattamento relativamente difficile da acquisire.

Ogni anno, nelle regioni temperate di solito in primavera, le correnti di marea introducono in laguna le larve di un gran numero di specie bentoniche costiere. Dopo alcune settimane, però, si nota che solo poche di esse sono sopravvissute alle dure condizioni di vita e possono affiancarsi a quelle che vi compiono l'intero ciclo vitale. Anche se il reclutamento iniziale è del tutto aleatorio, da questi eventi selettivi emerge una popolazione originale costituita principalmente da poche specie di anellidi policheti, crostacei, molluschi e pesci. La sua organizzazione è sempre riconoscibile nei vari bacini, al di là delle loro differenze chimico-fisiche, sedimentologiche e morfologiche. In particolare, la distribuzione delle specie è in larga misura indipendente dalla salinità.

Le lagune costiere, come gli estuari, le piattaforme continentali e le zone oceaniche di risalita, possono essere immaginate come isole ad alta produttività biologica disperse in una immensa distesa relativamente povera di vita. In questi ecosistemi gli organismi vegetali producono in media 200-400 grammi di sostanza organica per metro quadrato all'anno, un quantitativo che, in condizioni ottimali, può arrivare a 700-900 grammi, contro una media di circa 30-60 grammi nel resto dell'oceano. Una produzione primaria così elevata è in grado di mantenere grandi biomasse di consumatori primari e secondari che rendono economicamente molto remunerativi questi ambienti.

I principali meccanismi responsabili degli alti livelli di produzione primaria raggiunti nelle lagune sono oggi abbastanza chiari. L'ecosistema lagunare è attraversato da elevati flussi di energia che, oltre alla radiazione solare utilizzabile per la fotosintesi, comprendono varie forme di energia meccanica ausiliaria fornite dal vento e dalle maree. Questi flussi di energia ausiliaria non vengono direttamente sfruttati dagli organismi, ma assicurano loro il rifornimento delle risorse limitanti, aumentando in questo modo l'efficienza dei trasferimenti energetici da un livello trofico all'altro.

Come in tutti gli ecosistemi acquatici caratterizzati da una produzione primaria altrettanto alta, è la disponibilità di elementi nutritivi inorganici (nutrienti), in primo luogo nitrati e fosfati, a permettere lo sviluppo di un'abbondante flora planctonica e bentonica. Essendo bacini semichiusi e a rapida sedimentazione, le lagune fungono in certa misura da «trappole» per i nutrienti che sono di origine prevalentemente continentale nelle regioni temperate e umide, e marina in quelle aride. Al contrario di quanto avviene in mare aperto e nei laghi, la disponibilità dei nutrienti non è legata alla risalita stagionale di acque profonde, ma dipende direttamente dalla rimineralizzazione batterica che ha luogo nei sedimenti del fondo. La circolazione dei nutrienti nella colonna d'acqua dove vengono utilizzati è assicurata dalla forte turbolenza verticale indotta dal vento, che rappresenta un apporto energetico di tipo meccanico che lega il ciclo dei nutrienti alla produzione primaria. È per questo motivo che, nonostante la grande varietà di condizioni ecologiche reperibili, nella maggior parte delle lagune si osserva lo stesso tipo di ciclo dei nutrienti e la produzione primaria, pur essendo più elevata nella buona stagione, è distribuita nell'intero arco dell'anno e non è concentrata in brevi fioriture stagionali.

Il contributo relativo del fitoplancton alla produzione primaria è maggiore nelle lagune più profonde. Nelle altre la ri-

SPIAGGIA

FRONTE D'ONDA

Le barriere di materiale sedimentario che racchiudono le lagune costiere si formano a una certa distanza dalla costa lungo la fascia qui rappresentata in blu chiaro. Lì si incontrano, annullandosi parzialmente, l'onda in arrivo (*freccia in blu*) e quella di ritorno o risacca (*freccia in grigio*). La diminuita velocità delle acque fa sì che in questa zona si depositino i sedimenti in sospensione e quelli trascinati dalle onde, formando con l'andare del tempo una barriera che isola dalle acque marine esterne un bacino lagunare poco profondo.

Abbiamo qui riunito alcuni esempi di forme di vita che trovano nelle lagune costiere il loro habitat ideale occupando vari livelli nella catena alimentare dell'ecosistema. In alto a sinistra, un germano che si ciba di piante e piccoli animali; a fianco, un cormorano, abile predatore di pesci di discrete dimensioni; al centro a sinistra, colonia di comuni gabbiani che si nutrono di pesci e molluschi, ma che sono anche avidi spazzini; a destra, fenicotteri ripresi negli stagni della Camargue mentre si alimentano filtrando il plancton col becco; in basso a sinistra alcune anguille, voraci carnivori che migrano nelle acque delle lagune dove trovano cibo in quantità; a fianco, distesa di mitili, molluschi filtratori abbondantissimi in tutte le nostre acque costiere sia spontanei che coltivati.

In questa rappresentazione schematica delle reti trofiche lagunari i blocchi rappresentano i principali compartimenti dell'ecosistema e le frecce i flussi di sostanza organica, quindi di energia, tra i compartimenti. Il compartimento centrale rappresenta il fondo organico particolato. Le dimensioni progressivamente minori delle frecce indicano la perdita di energia - dovuta alla respirazione degli organismi - al passaggio da un livello trofico al successivo. Le frecce in grigio chiaro rappresentano i flussi di sostanza organica disciolta.

duzione della colonna d'acqua in cui può aver luogo la fotosintesi è compensata dal maggiore contributo delle macrofite e delle microfite bentoniche. In laguna, tuttavia, non esiste una netta divisione tra le due componenti produttive: in condizioni di calma gli organismi fitoplanctonici affondano fino a depositarsi sul fondo, mentre quando le acque sono agitate, come accade quando soffia vento forte, sono le microfite bentoniche a essere messe in sospensione nella colonna d'acqua.

Spesso proprietà comuni ad ambienti differenti emergono a livello di ecosistema. È sorprendente che, nonostante i contributi relativi siano molto diversi, nelle lagune, negli estuari, nelle più produttive aree costiere e in quelle oceaniche di risalita la massima produzione primaria annuale ottenibile sia dello stesso ordine di grandezza. Essa è pari all'1,5 per cento della radiazione solare incidente ed equivale a 0,3-0,5 $\times$ 10^5 chilojoule per metro quadrato all'anno, a seconda della latitudine. Come in altri ecosistemi costieri, una integrazione non trascurabile della base alimentare per la comunità animale è fornita dai batteri, che utilizzano la sostanza organica e inorganica disciolta nell'acqua escreta dai vari organismi della comunità convertendola in biomassa particolata.

L'energia fissata dalle piante compie, all'interno della comunità animale, percorsi che sono ancora in gran parte sconosciuti. Alla semplicità strutturale del popolamento delle lagune, derivante dal ristretto numero di specie presenti, corrisponde un'elevata complessità delle catene alimentari.

Tradizionalmente i flussi di energia negli ecosistemi vengono suddivisi tra catene di pascolo e catene di detrito, costituite da organismi appartenenti ciascuno a un particolare livello trofico. Nel caso delle lagune questo vuol dire che soltanto una parte della produzione primaria verrebbe consumata direttamente dagli erbivori. Una percentuale intorno al 50 per cento del fitoplancton e intorno al 90 per cento delle macrofite verrebbe infatti consumata solo dopo la morte delle piante stesse sotto forma di detrito organico. Il detrito, colonizzato da batteri e da altri microrganismi eterotrofi che ne aumentano il valore nutritivo, verrebbe utilizzato dai consumatori primari i quali, a loro volta, verrebbero predati dai carnivori primari, questi dai carnivori secondari e così via.

Con maggiore realismo, le reti trofiche lagunari vengono oggi considerate composte da tre soli livelli, che non corrispondono tuttavia ai livelli trofici tradizionali. Il primo è quello del «fondo organico particolato», che include tutte le forme di materiale organico vivo o morto presenti sotto forma di particelle. Non solo materiale vegetale in decomposizione dunque, ma anche batteri, protozoi, nematodi, larve di molti invertebrati e microflora bentonica. Il secondo livello è costituito dai consumatori di questo fondo. Comprende la maggior parte degli invertebrati bentonici, sia filtratori sia limivori, come molti anellidi, crostacei e molluschi, e alcuni pesci della famiglia dei mugilidi. Si tratta in realtà di un livello trofico misto costituito da specie che non possono venire rigidamente definite erbivore, o detritivore, o predatrici primarie, e quindi non si possono assegnare a un livello trofico preciso. Sono specie onnivore «opportuniste», che si nutrono poco selettivamente di ogni tipo di materiale organico all'interno di una certa classe di dimensioni che possono trovare sul o nel sedimento.

Misurando, infatti, i trasferimenti energetici tra i vari comparti funzionali dell'ecosistema si osserva che la produzione dei consumatori primari è in genere pari al 10 per cento della produzione primaria. Questo rapporto è molto simile a quello caratteristico del trasferimento energetico da un livello trofico al successivo in ogni tipo di ecosistema, per esempio in una catena di pascolo piante-erbivori. Esso suggerisce che in laguna la produzione primaria venga utilizzata in modo analogo, senza cioè l'interposizione di un ulteriore livello trofico di microrganismi decompositori, nel qual caso si osserverebbe una produzione di un ordine di grandezza inferiore. Questo fenomeno spiega l'importanza economica delle lagune, dal momento che il secondo livello, costituito da molte specie di molluschi, viene sfruttato direttamente come alimento dai crostacei e dai pesci che, a sua volta, l'uomo pesca per il suo consumo.

Il fatto che il legame tra il compartimento autotrofo dell'ecosistema e quello eterotrofo sia costituito dal detrito comporta una relativa stabilità delle risorse alimentari. È il contrario di quanto avviene nelle catene di pascolo piante-erbivori, nelle quali le popolazioni animali dipendono dalla disponibilità di materiale vegetale vivo. Il detrito organico funge infatti da volano, svincolando in certa misura la comunità animale dalle fluttuazioni della produzione primaria e quindi stabilizzando la popolazione.

Alcune specie carnivore di anellidi policheti e di crostacei decapodi (gamberi, granchi e paguri) e la quasi totalità dei pesci e degli uccelli costituiscono il terzo livello delle reti trofiche, quello dei predatori ai vertici delle catene alimentari. Sono poche le specie di pesci che compiono in laguna tutto il loro ciclo vitale, e quelle che lo fanno molto spesso non vi svolgono un ruolo ecologico dominante e sono di scarsa importanza economica. La maggior parte dei pesci sono ospiti temporanei che si riproducono in mare ed entrano in laguna, allo stato di larve o di avannotti, perché vi trovano abbondante nutrimento e un ambiente relativamente libero da predatori. Tra essi sono dominanti specie economicamente pregiate come orate, spigole e anguille.

Sebbene ciascuna specie abbia un proprio calendario migratorio locale, gli ingressi avvengono tra la fine dell'autunno e l'inizio della primavera. Durante l'estate, stagione in cui maggiore è la biomassa disponibile, la popolazione è stabile. Il ritorno in mare, tranne che per le anguille che si fermano per qualche anno, ha luogo tra la fine dell'estate e l'inizio dell'inverno. Non si sa con esattezza quali siano gli stimoli che guidano l'ingresso dei pesci, anche se è noto che il flusso migratorio diminuisce quanto più le condizioni mesologiche della laguna differiscono da quelle delle acque marine. Le migrazioni stagionali dei pesci, insieme all'ingresso e all'uscita di sostanza organica al seguito delle correnti di marea, collegano le reti trofiche lagunari con quelle marine costiere.

Purtroppo siamo ancora lontani da una comprensione approfondita delle reti trofiche lagunari. La loro complessità trova una prima ragione nell'eclettismo alimentare delle singole specie, che si traduce in un elevato grado di interconnessione tra le catene trofiche. La possibilità di attingere a svariati tipi di risorse è un evidente adattamento alla vita in un ambiente biologicamente molto variabile. Anche la diversa disponibilità, nelle varie zone di una laguna, dell'energia meccanica ausiliaria dipendente dalla morfologia del bacino è la causa dei differenti gradi e modalità dei trasferimenti energetici osservati. Il movimento delle acque all'interfaccia acqua-sedimenti ripristina una serie di gradienti chimici dai quali dipende l'attività della microflora bentonica e dei microrganismi eterotrofi, cioè parte della produzione al primo livello. Questo movimento è

L'uomo ha sviluppato nel corso dei secoli tecniche sempre più valide per lo sfruttamento delle lagune ai fini della pesca. Poiché molte specie di pesci compiono migrazioni stagionali, il sistema inizialmente adottato è stato quello illustrato nel disegno: attrezzare con barriere (lavorieri) il canale di accesso alla laguna in modo da permettere l'ingresso delle forme giovanili impedendo l'uscita degli adulti. Successivamente sono state create strutture più complesse come la valle da pesca qui fotografata da un aereo in volo sulla laguna di Venezia.

Tradizionali sistemi di pesca tuttora praticati nelle lagune venete. In alto, i «casoni» della laguna di Grado; al centro, impianto per le reti nella laguna di Venezia; in basso, barche da pesca a Chioggia con i caratteristici panieri per l'allevamento dei granchi fino alla muta.

inoltre responsabile della disponibilità di cibo in sospensione per gli organismi filtratori e in particolare per molti molluschi, che sono infatti più diffusi nelle zone vicine allo sbocco a mare. Dove invece prevalgono condizioni di basso idrodinamismo sono più diffuse le forme limivore rappresentate per lo più da anellidi e crostacei. La presenza soltanto temporanea in laguna di una parte della popolazione, in particolare dei predatori di alto livello come i pesci, introduce un'ulteriore variabilità temporale nella configurazione delle reti trofiche.

Gli ecosistemi lagunari sono da considerarsi stabili? La domanda è nata insieme con lo studio scientifico di questi ambienti e ha importanza non soltanto teorica, ma anche pratica, poiché a essa è legata la possibilità di una corretta gestione delle risorse lagunari.

La stabilità di un ecosistema viene in genere definita come la sua capacità di resistere alle perturbazioni esterne, per esempio di tipo chimico-fisico. Da questo punto di vista le comunità lagunari sono da considerarsi instabili. Nel corso dell'anno le popolazioni possono subire variazioni numeriche notevolissime a causa della severità e incostanza delle condizioni ambientali. Larve di nuove specie penetrano dal mare e vi si stabiliscono, mentre altre possono andare incontro all'estinzione. Durante una crisi distrofica estiva può venire distrutta anche l'intera popolazione. Tuttavia, se sono osservate su più lunghe scale temporali, come è accaduto in Mediterraneo nel corso di più di 2000 anni di sfruttamento economico e gestione empirica e alcuni decenni di intensa indagine scientifica, le comunità lagunari mostrano una grande costanza sia nelle specie presenti che nel tipo di relazioni tra di esse.

Questa capacità di tornare rapidamente al proprio «baricentro ecologico» dopo una perturbazione si chiama resilienza, ed è un'accezione particolare del concetto di stabilità. La resilienza è il risultato dell'azione di meccanismi omeostatici della comunità evolutisi in risposta a un ambiente mesologicamente instabile. A livello delle singole specie ne sono responsabili adattamenti sia fisiologici, come l'osmoregolazione, l'alto tasso riproduttivo e la capacità di rallentare le funzioni vitali in condizioni di parziale anossia, sia etologici, come l'eclettismo alimentare e la capacità di spostarsi in zone più favorevoli. A livello di ecosistema, la prevalenza delle catene alimentari basate sul detrito fornisce una risorsa di base relativamente costante e l'alto grado di interconnessione nelle reti trofiche permette a molte specie di sfruttare nuove prede (o comunque nuove risorse) se quelle abituali vengono a mancare. Il collegamento con il mare infine facilita la rapida ricolonizzazione da parte di specie localmente estinte.

Ciò che distingue le lagune costiere da altri ecosistemi stabili ma non resilienti, come i laghi o le foreste, è che per quanto severa sia stata la perturbazione esse tornano alle condizioni di partenza in un tempo relativamente breve. In ecologia teorica si dice che esse hanno un solo dominio di attrazione. Gli altri ecosistemi invece resistono al cambiamento finché la perturbazione si mantiene entro certi limiti, ma se questi vengono superati cambiano bruscamente. Il ritorno alle condizioni originarie può allora richiedere moltissimo tempo, o addirittura non avvenire più. In questo caso si dice che l'ecosistema si è spostato su un nuovo dominio di attrazione, una nuova condizione di equilibrio in cui è destinato a restare.

Anche le attività umane costituiscono delle perturbazioni. La pesca per esempio è una perturbazione molto forte, perché consiste in larga misura nella rimozione dall'ecosistema dei carnivori di alto livello, con ripercussioni che si estendono alle intere reti trofiche. La quasi totale scomparsa di alcuni stock ittici nei grandi laghi nordamericani tra il 1946 e il 1950 e nel mare del Nord tra gli anni cinquanta e sessanta è stata causata da un'eccessiva attività di pesca, in seguito alla quale questi sistemi sono stati forse definitivamente spostati dalle originarie condizioni di equilibrio tra le varie popolazioni.

Nelle lagune costiere invece il pronto ripristino dei precedenti livelli di pescosità ha fatto seguito a periodi di sfruttamento talora molto intenso, come anche ad altri tipi di danno all'ecosistema.

Sebbene i livelli della produzione primaria nelle lagune costiere siano dello stesso ordine di grandezza di quelli delle più produttive aree marine, le quantità di pescato da esse ottenute sono in genere, per unità di superficie, molto maggiori. Le lagune infatti godono degli apporti energetici ausiliari forniti dal vento e dalle maree. Secondo dati raccolti dalla FAO la produzione media annuale delle lagune costiere mondiali è di 107 chilogrammi per ettaro all'anno, contro i 59 delle piattaforme continentali e addirittura i 26 dei laghi. Molte lagune tuttavia sono in grado di sostenere produzioni di 300-400 chilogrammi per ettaro all'anno, che arrivano in alcuni casi a 800-900 chilogrammi.

In alcune regioni, come il bacino del Mediterraneo, lo sfruttamento delle risorse lagunari è già citato dagli autori classici e ha probabilmente origini più antiche. Tradizionalmente consiste nella raccolta o nell'allevamento di molluschi e nella pesca basata sulla conoscenza delle migrazioni stagionali dei pesci. Ancora oggi il più semplice sistema di pesca consiste nella costruzione, lungo i canali aperti dalle correnti di marea nelle barriere, di «lavorieri», sorta di grate metalliche o di legno che permettono l'ingresso delle larve e degli avannotti, ma impediscono l'uscita degli individui adulti.

Nel corso dei secoli si è consolidato un vasto corpo di conoscenze empiriche sulla gestione degli ecosistemi lagunari, centrato sul controllo degli affluenti e sulla manutenzione degli sbocchi a mare. Le ragioni dell'alta produttività, ma anche della stessa conservazione fisica delle lagune, risiedono infatti nell'equilibrio tra immissione di acque dolci, apportatrici di nutrienti, ma anche di sedimenti che tendono a lungo andare a interrarle, e fattori della vivificazione marina, responsabili della stabilità mesologica e dell'ingresso delle larve di gran parte della popolazione faunistica. La validità di queste conoscenze può essere tuttora apprezzata studiando, per esempio, la serie di interventi attuati nel corso dei secoli nella laguna di Venezia.

Fino a qualche tempo fa, tranne rare eccezioni come la vallicoltura veneta, lo sfruttamento delle risorse lagunari è consistito nella semplice raccolta di quanto la natura spontaneamente produce. Oggi invece sono state sviluppate tecniche di acquacoltura che permettono di sfruttare in maniera più razionale la naturale produttività delle lagune senza arrecare danni all'ambiente. Si tratta di una serie di attività rivolte, da una parte, ad aumentare la produttività mediante interventi di fertilizzazione e di regolazione dei flussi idrici, dall'altra a introdurre individui giovani di specie apprezzate sul mercato, in quantità compatibili con le capacità produttive dei bacini. Ma c'è ancora spazio per rendere più proficue queste attività grazie a una migliore comprensione dei meccanismi produttivi e dei flussi energetici di questi ecosistemi. Già ora comunque si possono ottenere raccolti che possono raggiungere la tonnellata per ettaro all'anno a seconda del livello trofico delle specie sfruttate.

Trattandosi per lo più di tecniche semplici e di bassa tecnologia, esse sono di facile introduzione nei paesi in via di sviluppo. Il potenziale produttivo globale delle lagune, specialmente nelle regioni tropicali, è infatti enorme e ancora quasi intatto.

L'uso da parte dell'uomo pone però alcuni problemi di conservazione. In passato la più diffusa forma di danno alle lagune costiere è stato l'interramento. Questo veniva effettuato allo scopo di recuperare terre coltivabili e per limitare la diffusione della malaria. In Italia, per esempio, sono stati drasticamente ridotti in questo modo i sistemi lagunari pugliesi e medio-tirrenici che un tempo erano molto estesi - basti pensare che in epoca romana si poteva navigare da Fiumicino a Pozzuoli senza dover mai farlo in mare aperto - e in parte anche quelli dell'alto Adriatico.

Attualmente i problemi maggiori sono posti dalla vulnerabilità geologica di questi ecosistemi. Già negli anni settanta la Commissione per l'ambiente costiero dell'Unione geografica internazionale faceva rilevare la prevalenza su scala mondiale dei fenomeni di erosione delle barriere su quelli di deposizione dei sedimenti. Se in alcuni casi questo fenomeno può essere attribuito a cause naturali come un innalzamento del livello del mare rispetto alla terra, più spesso è dovuto all'intervento dell'uomo sul corso dei fiumi, apportatori di sedimenti, e sulle barriere stesse.

Non va inoltre trascurato il fatto che, essendo bacini semichiusi, le lagune hanno lunghi tempi di ricambio delle acque e dei sedimenti. Per questo motivo sono particolarmente vulnerabili nei confronti degli agenti inquinanti, che tendono ad accumularvisi, comportandosi come nutrienti.

Fortunatamente l'intervento umano è stato fino a oggi limitato per lo più alle lagune costiere delle zone temperate settentrionali, così che la maggior parte delle lagune nel mondo si trova ancora allo stato naturale. Lo studio scientifico di questi ecosistemi potrà fornire le basi di conoscenza per conciliare le crescenti pressioni per il loro sfruttamento economico con l'esigenza di conservarne l'integrità geologica e biologica per le generazioni future.

BIBLIOGRAFIA

EMERY K. O. e STEVENSON R. E., *Estuaries and Lagoons. I. Physical and Chemical Characteristics* in «Memoirs of the Geological Society of America», 1, pp. 673-693, 1957.

LEVINTON J., *Stability and Trophic Structure in Deposit-feeding and Suspension-feeding Communities* in «American Naturalist», 97, pp. 25-36, 1972.

SACCHI CESARE, *Les milieux saumâtres mediterranéens: dangers et problèmes de productivité et d'aménagement* in «Archives de Océanographie et Limnologie», 18, supplemento, pp. 23-58, 1977.

SACCHI CESARE, *The Coastal Lagoons of Italy* in *Ecological Processes in Coastal Environments*, Blackwell, Edimburgo, pp. 593-601, 1979.

BARNES STEPHEN RICHARD KENT, *Coastal Lagoons*, Cambridge University Press, Cambridge, 1980.

GUELORGET OLIVIER e PERTHUISOT JEAN-PIERRE, *Le Domain Paralique. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. Travaux du Laboratoire de Géologie*, Presses de l'École Normale Supérieure, Parigi, pp. 16-136, 1983.

QUIGNARD JEAN-PIERRE, *Le caractéristiques biologiques et environnementales des lagunes en tant que base biologique de l'aménagement des pêcheries*, in *Management of a Coastal Lagoon*, «Études Revues CGPM», a cura di Kapetsky e Lasserre, 61, pp. 1-35, 1984.

I superfluidi dell'elio 3

A temperature dell'ordine dei millikelvin l'elio liquido mostra effetti quantistici macroscopici; se si riuscirà ad avvicinarsi ulteriormente allo zero assoluto, si potrebbero ottenere fluidi ancor più straordinari

di Olli V. Lounasmaa e George Pickett

Le temperature incredibilmente alte dei primi istanti di vita dell'universo non potranno probabilmente essere mai raggiunte, neppure con i più grandi acceleratori di particelle. Ma i fisici delle basse temperature hanno già da tempo superato la natura. Nei 15 miliardi di anni trascorsi dal big bang, nessun punto, in tutto l'universo, ha raggiunto temperature inferiori a tre kelvin (la temperatura del fondo cosmico a microonde), mentre in laboratorio si ottengono temperature dell'ordine dei nanokelvin e dei picokelvin. I fenomeni studiati in queste condizioni non solo sono nuovi per la fisica, ma non si sono mai verificati in tutta la storia dell'universo.

Di tutti i fenomeni insoliti che hanno luogo a temperature ultrabasse forse i più spettacolari sono la superfluidità - ossia il flusso privo di attriti di un liquido - e il suo analogo in elettronica, la superconduttività. La superfluidità dell'elio 4 (l'isotopo più comune di questo elemento) è nota dal 1938. Nel 1972 Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson e David M. Lee della Cornell University scoprirono che anche l'elio 3 può diventare superfluido. Da circa 15 anni lo studio della superfluidità è di interesse centrale nella fisica delle temperature ultrabasse.

Il comportamento dell'elio 3 superfluido può essere molto complesso, pur trattandosi di un liquido semplice, composto da atomi identici e chimicamente inerti di un gas nobile. Oltre a essere di per sé interessante, questa combinazione di semplice e di complesso rende l'elio 3 superfluido una sostanza ideale per lo studio di molti altri problemi relativi alle fasi condensate della materia, dalle proprietà delle stelle di neutroni a quelle dei superconduttori ad alta temperatura.

A bassa temperatura l'elio è un «liquido quantistico», ossia la meccanica quantistica influisce profondamente non solo sulle sue proprietà microscopiche, ma anche su quelle macroscopiche. La natura superfluida dell'elio è un compromesso fra la meccanica quantistica, che impone un'indeterminazione minima fondamentale al comportamento dei singoli atomi, e il terzo principio della termodinamica, secondo cui in una sostanza deve instaurarsi l'ordine perfetto con l'approssimarsi allo zero assoluto. Ad alte temperature la fase dominante è quella gassosa e gli atomi hanno moti casuali; al diminuire della temperatura si ha liquefazione e successivamente congelamento in fase solida, la fase in cui la posizione di ogni atomo dovrebbe essere fissata univocamente.

Da un punto di vista quantistico, il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che non è possibile precisare simultaneamente la quantità di moto e la posizione di una particella; misurando la prima si produce indeterminazione nell'altra. Poiché gli atomi di elio sono molto leggeri e interagiscono debolmente, le loro posizioni sono indeterminate anche allo zero assoluto; non possono essere tenuti immobili abbastanza a lungo da formare un solido a bassa pressione perché la loro energia cinetica di punto zero è rilevante.

Il risultato è abbastanza paradossale: l'elio superfluido rimane liquido anche alle temperature più basse, ma al contrario dei liquidi comuni, in cui lo scorrimento fluido è segno di disordine interno, esso ha un ordine interno perfetto, anche se non evidente.

Il particolare ordinamento che si verifica nell'elio liquido è una conseguenza della distinzione stabilita in meccanica quantistica fra i fermioni (così chiamati in onore di Enrico Fermi) e i bosoni (che prendono il nome da Satyendra Nath Bose). Fra i bosoni vi sono le particelle portatrici di forze, come i fotoni e i pioni. Il loro spin è un multiplo intero del quanto fondamentale del momento angolare, $\hbar$, che è pari alla costante di Planck divisa per 2π. Un numero qualsiasi di bosoni può occupare simultaneamente lo stesso stato quantico, per cui allo zero assoluto tutti i bosoni di un dato sistema possono condensare nello stesso stato quantico di minima energia.

Le particelle che hanno spin uguale a un multiplo semiintero (1/2, 3/2 e così via) di $\hbar$, come gli elettroni, i protoni e i neutroni, sono fermioni, le particelle da cui è costituita la materia. In ogni momento un solo fermione può occupare un particolare stato quantico, il che esclude la possibilità che tutte le particelle condensino in un singolo stato di minima energia.

Un atomo di elio 4 è costituito da due elettroni, due protoni e due neutroni, ognuno con spin semiintero, per cui l'atomo nel suo complesso è un bosone. Quando l'elio 4 è raffreddato al di sotto di una temperatura critica, il punto lambda (2,17 kelvin a pressione nulla), il liquido inizia a condensare nello stato di minima energia. A temperature estremamente basse quasi tutto il liquido si trova in questo stato, e quindi un'unica funzione d'onda quantistica descrive non solo il comportamento delle singole particelle, ma anche quello del liquido a livello macroscopico.

Oltre a ciò, occorrono parecchia energia e quantità di moto per portare il liquido in uno stato eccitato. È questa condizione che genera la superfluidità. In un fluido normale le collisioni fra atomi o fra questi e le pareti del contenitore possono facilmente portare un atomo da uno stato energetico a un altro di energia quasi uguale e dissipare così il flusso di un fluido. L'elio liquido allo stato fondamentale, tuttavia, non può passare da uno stato energetico a un altro in seguito a collisioni a bassa velocità. Non vi sono meccanismi che dissipino energia.

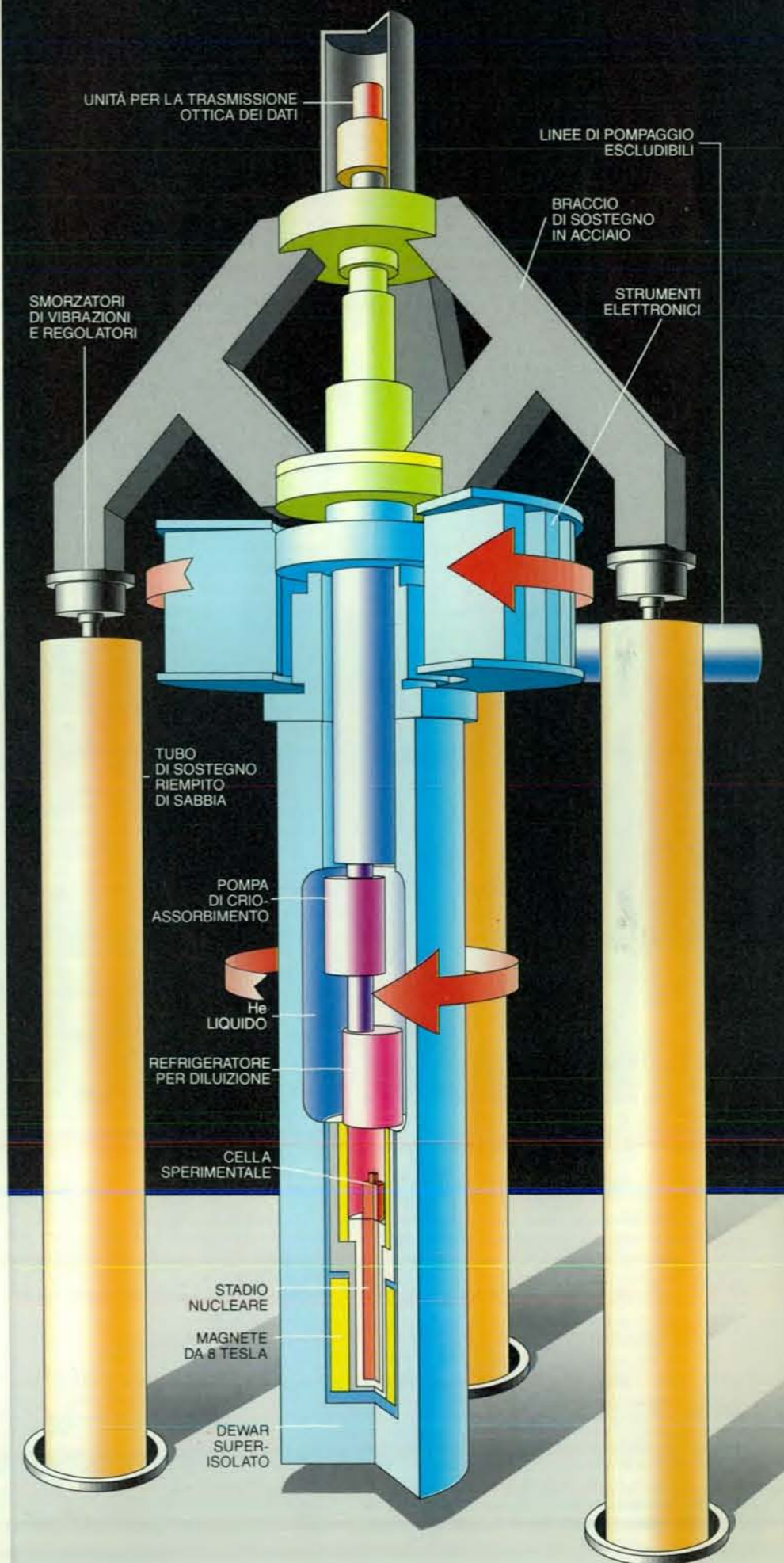
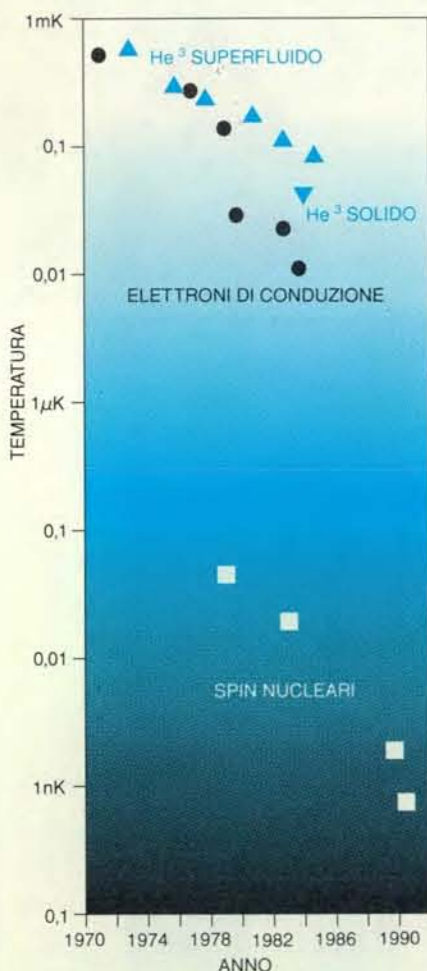
La superfluidità nell'elio 3 è di natura abbastanza diversa. Gli atomi di questo isotopo, che contengono un numero dispari di neutroni e quindi un numero totale dispari di particelle, sono fermioni e pertanto non sono in grado di condensare in un unico stato fondamentale. La conseguenza di ciò è che l'elio 3 non può divenire superfluido con la stessa facilità dell'isotopo bosonico. Tuttavia, a una temperatura di transizione circa 1000 volte più bassa di quella dell'elio 4, comincia a manifestarsi fra gli atomi di elio 3 una debole attrazione. Gli atomi la cui quantità di moto è uguale e opposta tendono a formare coppie nelle quali le due particelle orbitano a distanza l'una intorno all'altra. Queste coppie (chiamate coppie di Cooper dal nome di Leon N. Cooper, ora alla Brown University, che propose un analogo accoppiamento di elettroni per spiegare la superconduttività) sono bosoni, dato che i loro spin semiinteri si sommano fornendo un valore intero, e quindi possono condensare in un unico stato fondamentale e formare un superfluido.

In realtà si formano due superfluidi, denominati ^{3}He-*A* e ^{3}He-*B*. Nella fase *A* gli spin nucleari dei due atomi tendono a giacere in un piano perpendicolare all'asse del moto orbitale, mentre nella fase *B* la correlazione è meno evidente.

Dato che tutte le coppie di elio 3 si trovano nello stesso stato quantico, i rapporti fra spin e moto orbitale riguardano non solo le singole coppie ma l'intero superfluido. Nell'elio 3 superfluido si ha direzionalità, come in un cristallo liquido: le coppie di atomi possono essere allineate da fattori esterni come campi magnetici, flussi di liquido o superfici, e si dice allora che l'elio 3 superfluido possiede una struttura interna. (Gli atomi di elio 4 non hanno spin né proprietà direzionali particolari; perciò l'elio 4 superfluido non ha struttura interna.)

Il comportamento dei superfluidi è di natura profondamente diversa da quello dei fluidi convenzionali. Un'anomalia notevole si manifesta quando si cerca di far ruotare un superfluido. Un liquido normale in un secchio che ruota su se stesso a velocità costante si muove con la stessa velocità angolare del secchio, come se fosse un corpo solido. La velocità, e quindi anche il momento angolare, del liquido è proporzionale alla distanza radiale dall'asse di rotazione.

Tuttavia non è possibile far ruotare nello stesso modo l'elio superfluido, perché esso è un liquido quantistico. La rotazione uniforme implica che la velocità, e di conseguenza il momento angolare, del liquido aumenti linearmente con la distanza dall'asse di rotazione. Il momento angolare è inversamente propor-

Un criostato rotante provoca la formazione di vortici nell'elio 3 superfluido. Questo dispositivo sperimentale dell'altezza di tre metri, installato presso il Politecnico di Helsinki, può raggiungere una velocità di rotazione di 30 giri al minuto. Oltre all'elio liquido, contiene sensori sperimentali e un sistema di raffreddamento a più stadi.

zionale alla lunghezza d'onda e quindi le funzioni d'onda quantistiche degli atomi della parte più esterna del liquido devono avere una lunghezza d'onda minore di quella degli atomi più vicini all'asse di rotazione. Questo è certo possibile per gli atomi di un liquido normale perché ciascuno possiede la propria funzione d'onda. Ma tutti gli atomi di un campione di elio superfluido sono descritti da un'unica funzione d'onda quantistica ed è geometricamente impossibile costruire

Le temperature più basse mai raggiunte sono state ottenute nell'elio 3, che deve essere raffreddato per contatto con altre sostanze, negli elettroni di metalli raffreddati per ordinamento magnetico e in nuclei metallici considerati da soli. Le temperature più basse nell'elio 3 liquido (circa 100 microkelvin) sono state raggiunte a Lancaster. (Il gruppo di Hidehiko Ishimoto dell'Università di Tokyo ha portato l'elio 3 solido a 43 microkelvin.) Il gruppo di Lancaster ha anche raffreddato gli elettroni di conduzione del rame a 12 microkelvin, un record eguagliato da Frank D. M. Pobell e colleghi dell'Università di Bayreuth. Nel febbraio di quest'anno, a Helsinki, Pertti J. Hakonen e Shi Yin hanno portato la temperatura nucleare di un campione d'argento a 800 picokelvin.

un insieme di creste e ventri disposti circolarmente la cui spaziatura diminuisca all'aumentare del raggio. L'elio superfluido esiste in uno stato di non rotazione nei confronti dell'intero universo.

Una funzione d'onda la cui lunghezza d'onda aumenti all'aumentare del raggio è viceversa possibile. Questo andamento corrisponde al moto vorticoso di un liquido: il flusso è più veloce al centro del vortice e rallenta all'aumentare del raggio. In effetti, se si fa ruotare su se stesso un contenitore riempito di elio superfluido, anche a velocità angolare relativamente bassa, lo stato stazionario cessa di esistere e si ha formazione di minuscoli vortici. La rotazione non è distribuita uniformemente come avviene in un liquido convenzionale, ma si propaga nell'elio superfluido lungo l'asse dei vortici. Le interazioni fra i vortici e fra questi e le pareti del contenitore generano un certo attrito, e pertanto in queste condizioni l'elio non è più completamente superfluido.

Il flusso rotatorio associato a ciascuno di questi vortici in miniatura respinge i vicini, cosicché i vortici formano un reticolo esagonale regolare. A una tipica velocità sperimentale di rotazione, pari a 12 giri al minuto, la distanza fra i vortici è di circa 0,2 millimetri. (Il reticolo di vortici nell'elio 4 è stato fotografato direttamente da Richard E. Packard e collaboratori dell'Università della California a Berkeley.)

I vortici si formano facilmente in un volume non confinato di superfluido, ma collocando quest'ultimo in un contenitore riempito di piccole particelle - per esempio allo scopo di osservare la viscosità incredibilmente ridotta del fluido - si inibisce la formazione di vortici. Il fluido può scorrere senza attrito fra le particelle, ma non c'è spazio a sufficienza perché si sviluppi un flusso rotatorio. Questo fatto genera una situazione paradossale: quanto più sono fini i pori attraverso cui si fa passare un superfluido, tanto più velocemente esso scorre.

I vortici superfluidi nell'elio 4 sono già abbastanza interessanti, ma la struttura interna dell'elio 3 superfluido dà origine a vortici dal comportamento ancora più complesso. Lo studio sperimentale di questi fenomeni è estremamente difficile: non solo si devono raffreddare i campioni fino ad appena qualche millikelvin o meno, ma occorre anche farli ruotare per produrre i vortici. Finora si è riusciti a risolvere questo problema solo facendo ruotare l'intero dispositivo sperimentale.

La maggior parte dei dati sui vortici nell'elio 3 è stata ottenuta a Helsinki con il criostato ROTA 1, in funzione dal 1981. Con questo dispositivo si raggiungono una velocità di rotazione anche di 30 giri al minuto e una temperatura di soli 0,6 millikelvin. Un modello perfezionato, ROTA 2, è divenuto operativo nel 1988. ROTA è un progetto eseguito in collaborazione dall'Accademia di Finlandia e dall'Accademia delle scienze dell'Unione Sovietica; fra coloro che vi hanno preso parte vi sono M. Peter Berglund, Juri M. Bun'kov, Devi Garibašvili, Pertti J. Hakonen, Olli T. Ikkala, Seppo T. Islander, Matti Krusius, Olli V. Lounasmaa, Juri Mukharskij, Kaj K. Nummila, Jukka P. Pekola, Riita H. Salmelin, Juha T. Simola, Ladislav Skrbek e Jelil S. Tsakadze. I contributi teorici di Martti M. Salomaa, Grigorij E. Volovik e collaboratori sono inoltre stati decisivi per il successo del progetto ROTA.

Quattro diversi metodi sperimentali sono stati impiegati per studiare il comportamento dell'elio 3 nel criostato rotante: la risonanza magnetica nucleare (NMR); il giroscopio a corrente alternata, che misura le variazioni di momento angolare del superfluido; la mobilità ionica, che funge da sonda assai sensibile della struttura del fluido; e gli ultrasuoni, la cui attenuazione dipende dalla struttura interna del fluido.

Le attuali conoscenze sugli effetti della rotazione nell'elio 3 superfluido sono dovute in gran parte a studi condotti con la risonanza magnetica nucleare: l'elio 3 in rotazione è esposto a un campo magnetico costante, che provoca precessione dell'asse di rotazione dei nuclei. Un segnale a radiofrequenza viene impiegato per invertire gli spin nucleari e la frequenza adatta a provocare l'inversione dipende dalle interazioni fra gli atomi di elio 3.

Gli ioni negativi danno di solito informazioni utili sulla struttura interna dell'elio 3 superfluido, in particolare sull'allineamento a livello macroscopico degli spin e sull'orientazione degli assi orbitali delle coppie di Cooper. Il moto di questi ioni nel fluido per effetto di un campo elettrico dipende fortemente dall'orientazione del campo e dalla struttura interna del superfluido.

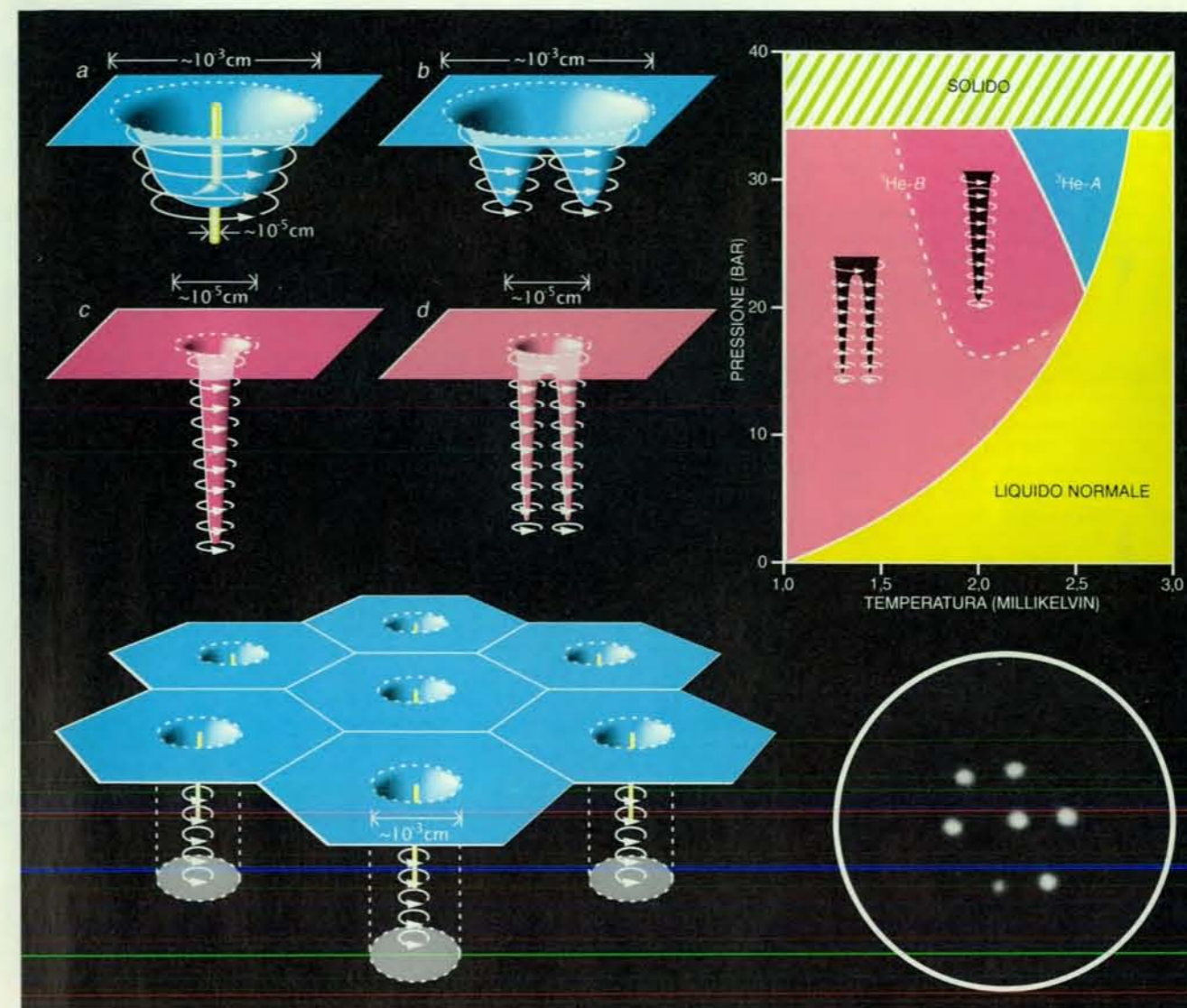
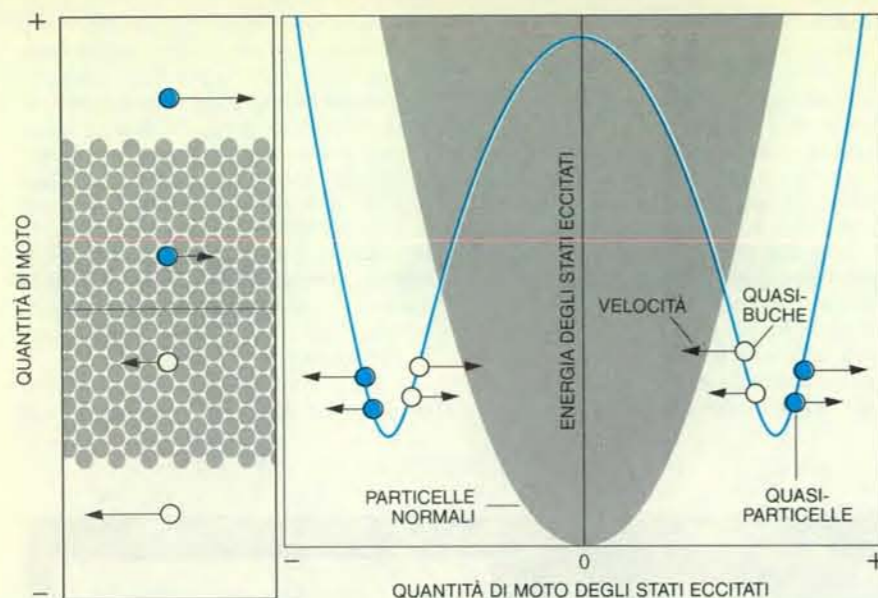
Così pure, l'attenuazione degli ultrasuoni rappresenta una sonda assai sensibile della struttura interna dell'elio 3 superfluido. Il vantaggio del metodo degli ultrasuoni è che può essere impiegato in presenza di qualunque campo magnetico. Esperimenti sistematici con gli ultrasuoni sono già stati effettuati con il criostato ROTA 2 su vortici generati nell'^{3}He-A, in presenza di campi magnetici di bassa intensità, e nell'^{3}He-A_1, un'altra fase superfluida che si forma in presenza di campi magnetici intensi.

L'esperimento con il giroscopio a corrente alternata, a cui ha preso parte anche Packard, ha permesso di misurare le proprietà di flusso dell'elio 3. Il giroscopio è costituito da un toro orizzontale riempito di elio 3 e materiale plastico polverizzato (per facilitare lo scorrimento superfluido), da un meccanismo che fa vibrare il toro e da strumenti che misurano la risposta del superfluido.

In un tipico esperimento con il giroscopio, inizialmente si raffredda l'elio 3 a una temperatura molto inferiore a quella di transizione a superfluido, mantenendo il campione a riposo. Poi il criostato che contiene il toro (nel quale vi sono l'elio 3 e il materiale plastico polverizzato) viene fatto ruotare per un minuto a una velocità compresa tra uno e 20 giri al minuto. Nei cinque minuti successivi alla rotazione gli sperimentatori registrano l'ampiezza delle vibrazioni intorno all'asse verticale; queste vibrazioni sono causate dalla precessione del superfluido rotante nel toro e costituiscono una misura del momento angolare.

Se la velocità di rotazione è bassa non vi è momento angolare nel dispositivo dopo che il criostato è stato fermato. Quando esso ruota lentamente il superfluido si limita a scivolare senza attrito attraverso i pori del materiale polverizzato nel toro. Al di sopra di una velocità critica di 2-3 giri al minuto, iniziano a formarsi vortici; il superfluido viene trascinato e inizia a ruotare. Un certo momento angolare si conserva nel toro dopo che il criostato viene fermato.

Uno dei primi esperimenti eseguiti con il giroscopio è stato un attento esame per controllare se l'^{3}He-B fosse veramente un superfluido. Il criostato veniva fatto ruotare alla velocità massima per generare un grande momento angolare nel giroscopio a corrente alternata; veniva quindi fermato e si misurava il momento angolare. Dopo che il criostato era rimasto fermo per 48 ore, mantenuto a una temperatura inferiore al punto di transizione a superfluido, si misurava di nuovo il momento angolare del fluido nel toro. Il momento angolare dell'^{3}He-B rimaneva costante, nei limiti dell'errore sperimentale (che è pari al 10 per cento). La resistenza al flusso ricavata attraverso questo studio è almeno 1000 miliardi di volte inferiore a quella del normale elio 3 liquido alla stessa temperatura.

È impossibile dimostrare sperimentalmente che l'^{3}He-B ha una resistenza al

Fra le proprietà più strane dell'elio 3 superfluido vi è la formazione di almeno quattro tipi diversi di vortici quando il fluido viene fatto ruotare. Le sue proprietà quantistiche gli impediscono di ruotare come un tutto unico, allo stesso modo dei liquidi normali. Un diagramma di fase (*in alto a destra*) mostra le condizioni di formazione dei vortici. Nell'^{3}He-A possono formarsi sia vortici a nucleo singolo (*a*) sia vortici a nucleo sdoppiato (*b*). Il tipo di vortice che si forma dipende da come è stato raffreddato il campione. Il vortice a nucleo singolo presenta una discontinuità: una minuscola «cordicella» di fluido normale passa attraverso il suo centro. Anche nella fase *B* si ha la formazione di vortici a nucleo singolo (*c*) e sdoppiato (*d*). Il diametro dei vortici dell'^{3}He-B è molto inferiore a quello dei vortici della fase *A* ed entrambi i vortici della fase *B* presentano discontinuità. I flussi che costituiscono i singoli vortici tendono a respingersi l'un l'altro, cosicché i vortici si dispongono in un reticolo esagonale stabile (*in basso*). Richard E. Packard dell'Università della California a Berkeley ha fotografato uno di questi reticoli nell'elio 4, nel quale si forma un solo tipo di vortice (*in basso a destra*).

Gli atomi non accoppiati nell'elio 3 liquido formano quasiparticelle e quasibuche. Gran parte degli atomi del superfluido è legata in coppie di Cooper (*in grigio*). Gli atomi non accoppiati sono associati a buche, ossia stati vuoti che nella coppia di Cooper sarebbero occupati dall'altro atomo. Se la quantità di moto degli atomi non accoppiati è alta essi «spiccano» e appaiono come quasiparticelle; se la loro quantità di moto è bassa essi si confondono nella miriade di atomi con bassa quantità di moto e compaiono le buche corrispondenti.

flusso nulla, ma questi risultati indicano oltre ogni ragionevole dubbio che esso è un vero superfluido, non semplicemente un liquido normale con viscosità molto bassa. Peter L. Gammel, ora agli AT&T Bell Laboratories, e John D. Reppy della Cornell University, utilizzando un dispositivo sperimentale leggermente diverso, hanno osservato supercorrenti persistenti anche nell'^{3}He-*A*.

In altri esperimenti condotti a Helsinki abbiamo studiato più in dettaglio il comportamento vorticoso. La velocità critica a cui i vortici iniziano a formarsi e il superfluido in fase *B* viene trascinato dal giroscopio presenta brusche variazioni in corrispondenza di certe temperature e pressioni. A una pressione di 23 bar e a una temperatura inferiore a 1,7 millikelvin la velocità critica è di 7,1 millimetri al secondo, mentre a una temperatura appena superiore è di soli 5,2 millimetri al secondo. Sembra che questa improvvisa variazione di proprietà evidenzi la formazione di diversi tipi di vortici nell'^{3}He-*B*. Il gruppo di Helsinki ha scoperto quattro diversi tipi di vortici nell'elio 3 superfluido, due nell'^{3}He-*A* e due nell'^{3}He-*B*, in contrasto con l'unico tipo esistente nell'elio 4.

Nella fase *A* dell'elio 3 uno dei tipi di vortice mostra una singolarità - ossia ha nel nucleo un punto di discontinuità dove la velocità di flusso cambia bruscamente direzione - mentre l'altro tipo di vortice, che ha un nucleo sdoppiato, è continuo. Nella fase *B* entrambi i tipi di vortici mostrano singolarità: vi è un punto di discontinuità nel campo delle velocità in corrispondenza del centro. Complesse analisi teoriche, eseguite dapprima da Erkki V. Thuneberg dell'Università di Helsinki e poi da Salomaa e Volovik, indicano che un vortice che si formi a una velocità critica bassa ha un solo nucleo cilindrico simmetrico intorno al quale scorre il fluido, mentre un vortice che si formi a una velocità critica più elevata ha un nucleo sdoppiato.

Anche quando è immobile, l'elio 3 contiene stati eccitati, associati ad atomi che non fanno parte di coppie di Cooper. A ogni atomo non accoppiato è associata una particella «ombra» (una «buca») rappresentata dallo stato non occupato dell'atomo a cui il primo si sarebbe accoppiato qualora lo stato fosse stato occupato. Questi stati eccitati combinano le proprietà di una particella e quelle di una buca. Se il momento angolare è rilevante predominano le proprietà «da particella», mentre se è piccolo prevalgono le proprietà «da buca». Lo stato eccitato viene quindi chiamato, a seconda dei casi, quasiparticella o quasibuca.

I dati sperimentali sul comportamento balistico delle quasiparticelle nell'elio 3 superfluido sono stati ottenuti in buona parte grazie a uno speciale criostato costruito nel 1980 da Tony M. Guénault e da uno di noi (Pickett) all'Università di Lancaster. Questo strumento è in grado di raffreddare l'elio 3 fino a circa 100 microkelvin, temperatura alla quale gli stati eccitati generati da effetti termici sono rari. Fra gli studiosi che hanno preso parte a questa ricerca vi sono John Carney, Kees Castelijns, Kenneth Coates, Shaun Fisher, Christopher Kennedy, Vepan Keith, Ian Miller, Simon Mussett, Gregory Spencer e Martin Ward. Lo stadio di raffreddamento nucleare di questo dispositivo è insolito per il fatto che l'elemento refrigerante di rame è immerso direttamente nel campione di elio 3 liquido, al fine di minimizzare la dispersione termica.

Lo studio dei campioni raffreddati in questo criostato è stato eseguito per mezzo di uno strumento straordinariamente semplice, ma efficace (ideato da Mervyn Black, Henry Hall e Keith Thompson): un filo sottile di materiale superconduttore piegato in modo da formare un cappio semicircolare e fissato a entrambe le estremità (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Se questo filo viene collocato in un campo magnetico di bassa intensità, la corrente elettrica che lo percorre è sottoposta a una forza cosicché il filo viene sospinto lateralmente.

Una corrente alternata della giusta frequenza può far oscillare il filo alla sua naturale frequenza di risonanza. Oltre a ciò il filo, muovendosi nel campo magnetico, genera una tensione proporzionale alla sua velocità. Il filo può essere messo in movimento facendovi passare attraverso una corrente elettrica e si può quindi osservare la risposta misurando la tensione. Questo semplice strumento è la sonda utilizzata in tutti gli esperimenti a bassissima temperatura nel laboratorio dell'Università di Lancaster.

A bassa velocità il moto del filo attraverso il superfluido avviene quasi senza che ci sia dissipazione di energia. L'attrito deriva solamente da fenomeni interni al filo e ai circuiti elettrici a esso associati e da collisioni con le quasiparticelle. L'entità dello smorzamento è quindi proporzionale al numero di stati eccitati nel fluido.

Dato che il numero di quasiparticelle varia con la temperatura, il filo può essere usato, senza alcuna modifica, come un termometro. Riuscire a misurare direttamente la temperatura del fluido in condizioni di temperature ultrabasse è senza dubbio molto importante. È quasi impossibile realizzare un buon contatto termico fra qualunque altro materiale termometrico e l'elio 3 liquido a 100 microkelvin perché la densità degli stati eccitati - ossia delle particelle che un termometro può rilevare - nel superfluido è paragonabile a un vuoto molto spinto a temperatura ambiente.

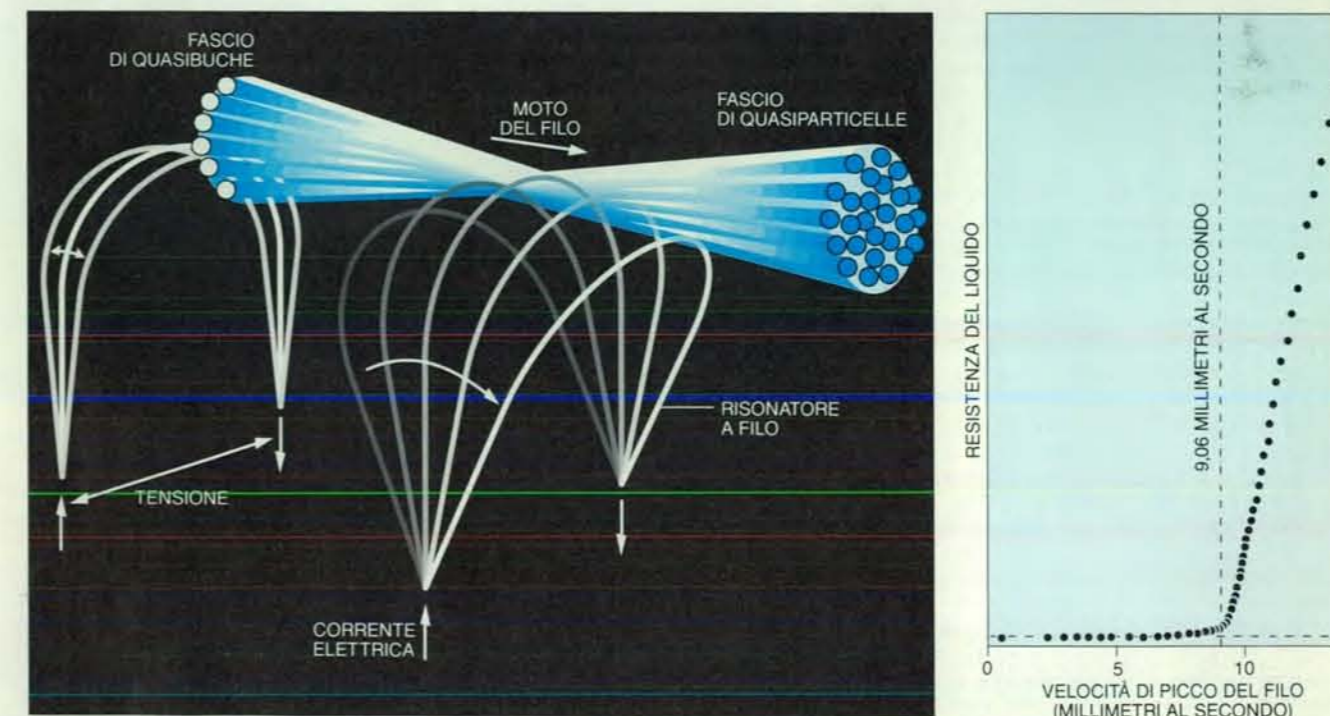
Oltre a essere quasi l'unico strumento capace di misurare direttamente la temperatura dell'elio 3, il termometro a cappio è anche molto sensibile. Infatti lo smorzamento varia di quasi cinque ordini di grandezza fra la temperatura di transizione a superfluido e la temperatura minima alla quale si può raffreddare l'elio 3 liquido.

La potenziale applicabilità del cappio superconduttore allo studio della struttura del fluido è ancora più importante della sua capacità di misurare la temperatura dell'elio 3 liquido. Come abbiamo visto, gli atomi dell'elio 3 superfluido sono legati in coppie di Cooper; quando la velocità massima del cappio supera i 10 millimetri al secondo circa, il filo può fornire a una coppia energia sufficiente a scinderla in due atomi, o quasiparticelle. A temperatura e velocità minime, il moto del filo attraverso il fluido avviene quasi senza attrito; una volta raggiunta la velocità critica, tuttavia, le forze legate all'attrito aumentano rapidamente di vari ordini di grandezza, e così lo smorzamento del filo, anche se l'incremento di velocità è solo di qualche punto percentuale. Dato che la variazione dello smorzamento è così clamorosa alla velocità critica, qualsiasi scorrimento anomalo del fluido intorno al filo (che altererebbe la velocità apparente di quest'ultimo) potrebbe modificare in modo radicale il punto nel quale lo smorzamento inizia la sua rapida ascesa.

La scissione delle coppie fornisce anche un metodo per produrre artificialmente in maniera controllabile quasiparticelle e quasibuche. Secondo il modello più semplice del processo di scissione delle coppie, sviluppato dal fisico canadese Philip Stamp, il filo funziona come un faretto mobile, emettendo un fascio di quasiparticelle in avanti e uno di quasibuche all'indietro. Presso la temperatura di transizione a superfluido una notevole percentuale delle particelle non è accoppiata e il cammino libero medio di una particella fra una collisione e l'altra è molto breve. Il «vento» di quasiparticelle viene quindi rapidamente diffuso e disperso da collisioni con le quasiparticelle e le quasibuche già presenti nel fluido. Tuttavia, riducendo la temperatura a un decimo della temperatura di transizione a superfluido, solo una particella su un milione risulta non accoppiata e la probabilità di collisione è tanto bassa che le particelle che costituiscono il «vento» potrebbero percorrere un chilometro o più senza subire urti.

Gli esperimenti a basse temperature hanno dimostrato che questo modello è fondamentalmente corretto. Se si immerge un altro filo nell'elio 3 liquido, le quasiparticelle e le quasibuche emesse dal primo filo esercitano una forza sul secondo, facendolo muovere e generando una tensione. Il secondo filo subisce una forza direttamente proporzionale al numero di stati eccitati che lo colpiscono. Il numero di particelle nel «vento» è a sua volta proporzionale all'energia dissipata dal primo filo. Pressoché tutta l'energia fornita al primo filo è trasformata in stati eccitati perché non vi è alcun altro meccanismo che permetta la dissipazione di energia. Siamo anche riusciti a confermare che il fascio è molto sottile osservando la distribuzione angolare delle quasiparticelle emesse.

Rimangono tuttavia alcuni misteri irrisolti. Dato che il filo si muove avanti e indietro, il fascio pulsante di stati eccitati dovrebbe essere costituito da «pacchetti» di quasiparticelle e quasibuche in alternanza. Nel normale processo di diffusione di una quasiparticella da parte di una superficie la quantità di moto della particella dovrebbe venire semplicemente invertita, cosicché essa imprimerebbe una spinta all'oggetto riflettente. Una quasibuca, invece, dato che possiede quantità di moto e velocità con versi opposti, quando viene riflessa dovrebbe esercitare un'azione traente. Tuttavia accade che il filo rivelatore subisca una spinta in entrambi i casi: sia quando viene colpito da pacchetti di quasiparticelle sia quando lo urtano pacchetti di quasibuche.

Per comprendere la ragione di questo fenomeno è necessario chiarire meglio la natura delle particelle e delle buche nell'elio 3. Il concetto di buca deriva dalla natura del livello di minima energia, o stato fondamentale, di un sistema di particelle. Nello stato fondamentale di un sistema di fermioni, per esempio, le particelle occupano tutti gli stati di energia fino a un certo livello che è determinato dal numero di particelle presenti, dato che due fermioni non possono trovarsi nello stesso stato. Tutti i livelli di energia superiore sono vuoti. Uno stato fondamentale così definito è quello che gli studiosi di teoria dei campi chiamano vuoto perché, fino a quando gli stati di bassa energia rimangono occupati e nessuna particella è promossa in uno stato non occupato, nulla può interagire con esso.

Un cappio di filo superconduttore mosso da una corrente elettrica e da un campo magnetico scinde le coppie di Cooper nel superfluido e forma fasci di quasiparticelle e quasibuche (*a sinistra*). Un secondo cappio rileva il «vento» di quasiparticelle, dal cui moto si risale alla struttura del superfluido. La scissione delle coppie aumenta rapidamente quando il filo supera una certa velocità critica (*a destra*).

Se si estrae un singolo fermione da uno degli stati occupati e lo si colloca in uno stato di energia più alta la situazione cambia nettamente. La particella nel livello energetico più elevato può ora interagire con diverse forze e si lascia alle spalle uno stato quantico vuoto: una buca. La particella e la buca si comportano in maniera sostanzialmente diversa. Se si imprime una spinta a una particella, essa si allontana. La sua quantità di moto e la sua energia aumentano o diminuiscono concordemente. Le buche, invece, hanno comportamento contrario: se si imprime una spinta a una buca essa si avvicina alla fonte della perturbazione. La quantità di moto di una buca diminuisce all'aumentare dell'energia e viceversa. Una buca si comporta pertanto come se possedesse una massa negativa.

Le particelle non accoppiate nell'elio 3 superfluido sono particolarmente interessanti. Le coppie di Cooper che costituiscono la parte superfluida - lo stato fondamentale - del liquido sono formate da particelle accoppiate aventi quantità di moto opposte. Di conseguenza gli atomi che non fanno parte di una coppia di Cooper sono accoppiati con una *buca* dotata di quantità di moto opposta o, se si preferisce, con uno stato vuoto nel quale dovrebbe trovarsi una particella con quantità di moto opposta. Questo fatto è alla base di un comportamento molto particolare.

Nel caso di una particella normale vi è una relazione semplice tra energia e quantità di moto: entrambe aumentano o diminuiscono concordemente. La situazione non è più così intuitiva quando si considerano le quasiparticelle dell'elio 3. Un atomo non accoppiato la cui quantità di moto sia elevata si distingue facilmente perché gli altri stati aventi un'alta quantità di moto sono vuoti, mentre la buca a esso associata (che è uno stato non contenente un atomo) è indistinguibile dagli altri stati vuoti che hanno quantità di moto elevata. La combinazione particella-buca appare esattamente come una particella reale e la sua energia è direttamente proporzionale alla quantità di moto. Al contrario, un atomo non accoppiato la cui quantità di moto sia bassa è indistinguibile dalla moltitudine di particelle accoppiate con bassa quantità di moto; è la buca avente bassa quantità di moto (che si muove in senso opposto a quello della particella) a distinguersi. E l'energia della buca aumenta al diminuire della quantità di moto. Fra questi due estremi vi è un punto in cui l'energia della combinazione particella-buca è minima e la sua velocità si annulla.

La direzione della velocità di una quasiparticella che ha quantità di moto bassa (e appare quindi come una buca) è opposta alla direzione della velocità di una quasiparticella con quantità di moto elevata (che appare come una particella). Di conseguenza una quasiparticella che entra in una regione dove una forza si oppone al suo moto perde gradualmente energia fino a che la sua velocità si annulla. A questo punto cominciano a prevalere le proprietà da buca, la direzione della velocità si inverte e la quasibuca ripercorre all'indietro la traiettoria precedente. In effetti una forza applicata trasforma in modo continuo la quasiparticella in quasibuca e viceversa. Questo processo, che non ha alcuna analogia con la diffusione delle particelle normali, è chiamato riflessione di Andreev, dal nome di Aleksandr F. Andreev dell'Istituto per i problemi fisici di Mosca che per primo propose questo meccanismo nel contesto dei superconduttori.

La riflessione di Andreev potrebbe spiegare perché il secondo filo nell'esperimento del fascio di quasiparticelle avverta una spinta da parte sia delle quasiparticelle sia delle quasibuche. Quando le quasiparticelle si trasformano in quasibuche per riflessione di Andreev in corrispondenza del secondo filo, questo subisce una spinta; e l'effetto di spinta si manifesta anche quando le quasibuche sono trasformate in quasiparticelle. Questo fenomeno è del tutto dissimile dal processo normale, nel quale i due tipi di stati eccitati producono effetti opposti.

Lo strumento a due fili non serve solamente per mostrare il bizzarro comportamento delle quasiparticelle e delle quasibuche, ma fornisce tutti i componenti necessari per studiare la dinamica delle quasiparticelle nell'elio 3 superfluido. Comprende una sorgente e un rivelatore e l'intero sistema opera a una temperatura di circa 100 microkelvin.

Le ricerche di laboratorio sul comportamento dell'elio 3 superfluido potrebbero aprire nuove prospettive allo studio di forme di materia che non esistono sulla Terra. Si ritiene, per esempio, che la materia neutronica nelle pulsar in rapida rotazione sia superfluida, anche se la temperatura di questi corpi celesti raggiunge i 100 milioni di kelvin. Ovviamente la materia neutronica non può essere studiata in laboratorio, ma è forse possibile simularne il comportamento servendosi di elio 3 o elio 4 superfluido in rotazione. I neutroni, come gli atomi di elio 3, sono fermioni e si pensa che la materia neutronica diventi superfluida tramite lo stesso meccanismo di formazione di coppie di Cooper che è operante nell'elio 3. Solo dettagliati calcoli teorici potranno stabilire se l'analogia tra l'elio 3 superfluido e la materia neutronica è abbastanza stretta perché questi modelli siano utili. Se è effettivamente così, si potranno condurre esperimenti sull'elio 3 allo scopo di studiare le condizioni esistenti nelle stelle di neutroni.

Vi sono probabilità di scoprire altri superfluidi sulla Terra? Un candidato promettente è una soluzione diluita di elio 3 in elio 4 superfluido. A seconda della pressione, si possono ottenere soluzioni che contengano fino al 10 per cento di elio 3. A una temperatura sufficientemente bassa gli atomi di elio 3 nella soluzione dovrebbero formare coppie di Cooper e dare origine alla fase superfluida. Nelle ricerche già condotte da diversi laboratori, tuttavia, finora non si è osservata alcuna transizione del genere. La densità degli atomi di elio 3 in una soluzione di questo tipo è molto bassa e le interazioni fra di essi sono assai deboli. Si stima che la temperatura di transizione sia dell'ordine dei nanokelvin, quindi molto inferiore agli 80-100 microkelvin che finora sono stati raggiunti con soluzioni diluite di elio 3 in elio 4.

Questo superfluido potrebbe consentirci di osservare tipi completamente nuovi di comportamento atomico. Gli atomi di elio 3 formerebbero un superfluido, ma all'interno di un solvente superfluido: il nuovo sistema sarebbe costituito da due superfluidi compenetrantisi ma indipendenti. Questo superfluido a due componenti dovrebbe avere un comportamento ancora più strano di quelli conosciuti fino a oggi.

Oltre a ciò la teoria indica che in una soluzione diluita di elio 3 potrebbero formarsi due tipi differenti di coppie di Cooper. Il tipo predominante in una data soluzione dipenderebbe dalla concentrazione di elio 3. Ad alte concentrazioni si avrebbero coppie con gli spin nucleari dei due atomi paralleli, come nell'elio 3 puro. A concentrazioni più basse, tuttavia, dovrebbero formarsi coppie con spin opposti mentre a concentrazioni intermedie i due tipi potrebbero coesistere fianco a fianco e dare origine a un superfluido a tre componenti.

La verifica di una simile possibilità sarà attuabile solo in futuro, perché è probabile che questa transizione avvenga solo a temperature molto al di là dei limiti attualmente raggiungibili. Tuttavia non vi è dubbio che queste prima o poi verranno effettivamente raggiunte.

BIBLIOGRAFIA

HAKONEN PERTTI e LOUNASMAA OLLI V., *Vortices in Rotating Superfluid ^3He* in «Physics Today», 40, n. 2, febbraio 1987.

GUÉNAULT A. M. e PICKETT G. R., *The Ballistics of Quasiparticles in ^3He-B at Very Low Temperatures* in «Physica Scripta», T19, aprile 1987.

SALOMAA MARTTI M. e VOLOVIK G. E., *Quantized Vortices in Superfluid ^3He* in «Reviews of Modern Physics», 59, n. 3, luglio 1987.

PICKETT G. R., *Microkelvin Physics* in «Reports on Progress in Physics», 51, n. 10, ottobre 1988.

HAKONEN PERTTI, LOUNASMAA OLLI V. e SIMOLA JUHA, *Vortices in Rotating Superfluid ^3He* in «Physica B», 160, n. 1, agosto 1989.

I pesci rana

Questi voraci predatori, maestri nell'arte del mimetismo, inghiottono la preda più velocemente di qualunque altro vertebrato

di Theodore W. Pietsch e David B. Grobecker

La mattina del 29 dicembre 1696 un capitano olandese e il suo equipaggio stavano cercando i superstiti di una nave affondata non lontano dalla costa occidentale australiana. Non venne ritrovato alcun superstite, ma l'equipaggio scorse arenato sulla spiaggia di un'isola vicina, in mezzo a ratti della taglia di gatti domestici, un pesce molto particolare. Il pesce, diverso da ogni altro che i marinai avessero mai visto prima, fu descritto come «lungo circa due piedi, con testa tondeggiante, specie di braccia e di gambe e perfino qualcosa di simile a mani». Secondo noi non c'è alcun dubbio (anche se la sua identità specifica non potrà mai essere nota) che questo strano pesce, descritto sommariamente tanto tempo fa, appartenesse all'ordine dei lofiformi, che comprende specie che vivono nei mari tropicali - ma si spingono anche nel Mediterraneo - e sono comunemente note come pesci rana, pesci rospo e rane pescatrici.

Come rivela il loro nome comune, questi insoliti pesci mostrano una sorprendente somiglianza con le rane o i rospi: hanno corpo (lungo da tre a 40 centimetri) globoso e fornito di pinne ben sviluppate simili a zampe che consentono loro di spostarsi su rocce, sabbia e banchi corallini, pressappoco come farebbe un tetrapode sulla terraferma. La loro epidermide può assumere quasi tutti i colori immaginabili, modificandoli nel giro di pochi giorni (in alcune specie addirittura nell'arco di pochi secondi) per confondersi con un oggetto del fondale, come per esempio un ramo di corallo. Ne risulta che un lofiforme, nello spostarsi da un substrato a un altro, può cambiare colore e mimetizzarsi con l'ambiente circostante. Poiché è virtualmente impossibile distinguere gran parte dei pesci rana dal substrato su cui si trovano, essi riescono a sfuggire non solo ai predatori, ma anche ai subacquei più esperti e agli ittiologi.

Il pesce rana di Commerson, *Antennarius commersoni*, diffuso negli oceani Pacifico e Indiano, è per molti aspetti rappresentativo del gruppo. Sia i maschi sia le femmine esibiscono una vasta gamma di colori (compreso il rosso, il giallo, il bruno, il bianco crema, il nero e varie tonalità intermedie); la loro pelle, inoltre, è ornata da piccole macchie brune e chiazze rosa disposte regolarmente. In acque poco profonde, dove i raggi solari raggiungono i fondali, il pesce assomiglia in modo straordinario a una roccia incrostata di alghe. Perfettamente mimetizzato, esso rimane immobile, classico esempio di predatore in agguato, pronto ad attaccare qualunque pesce o crostaceo si aggiri nelle sue vicinanze. Quando una preda adatta gli si avvicina nuotando, il pesce rana spalanca la grande bocca cavernosa inghiottendo la sfortunata vittima in pochi millesimi di secondo.

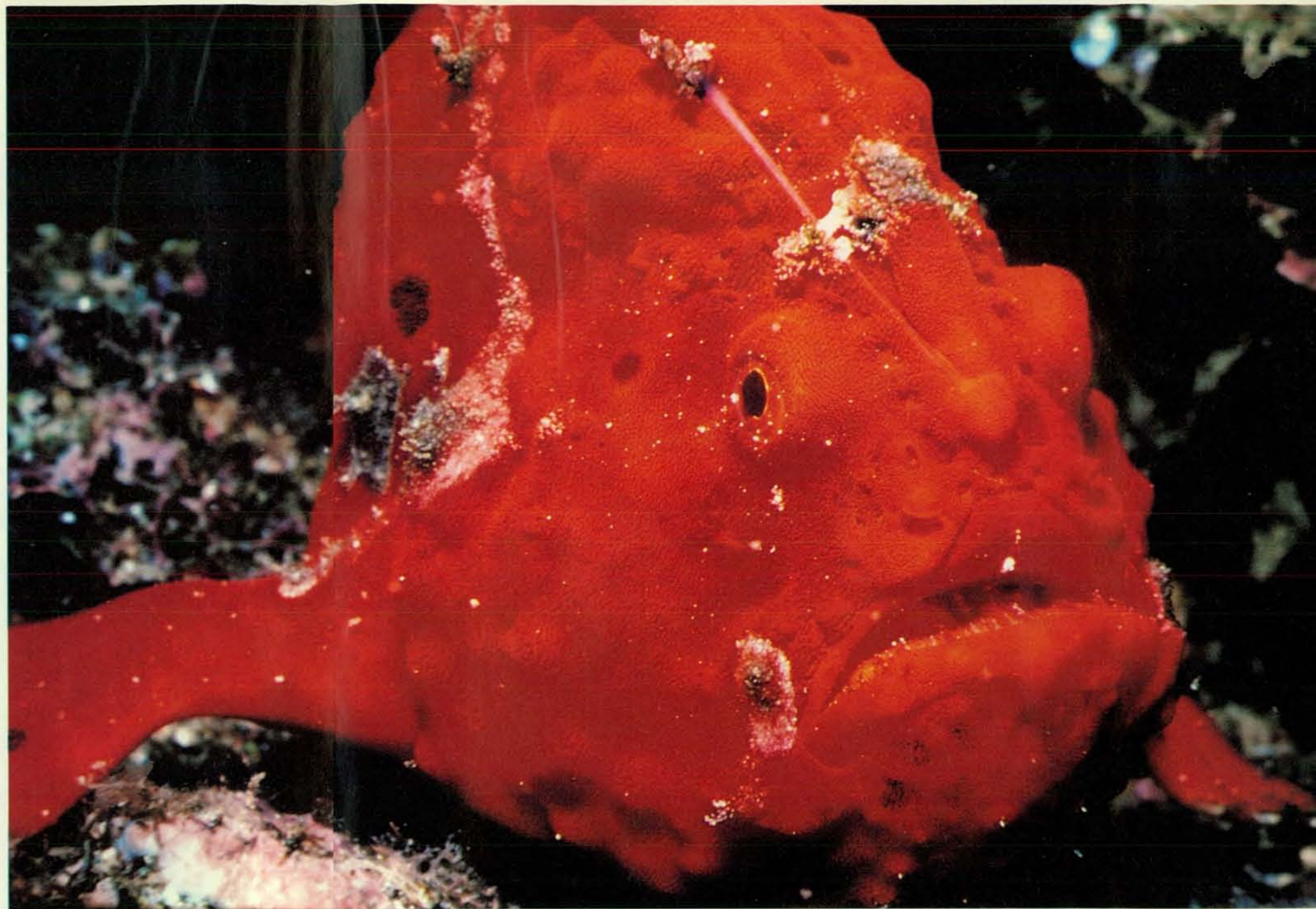
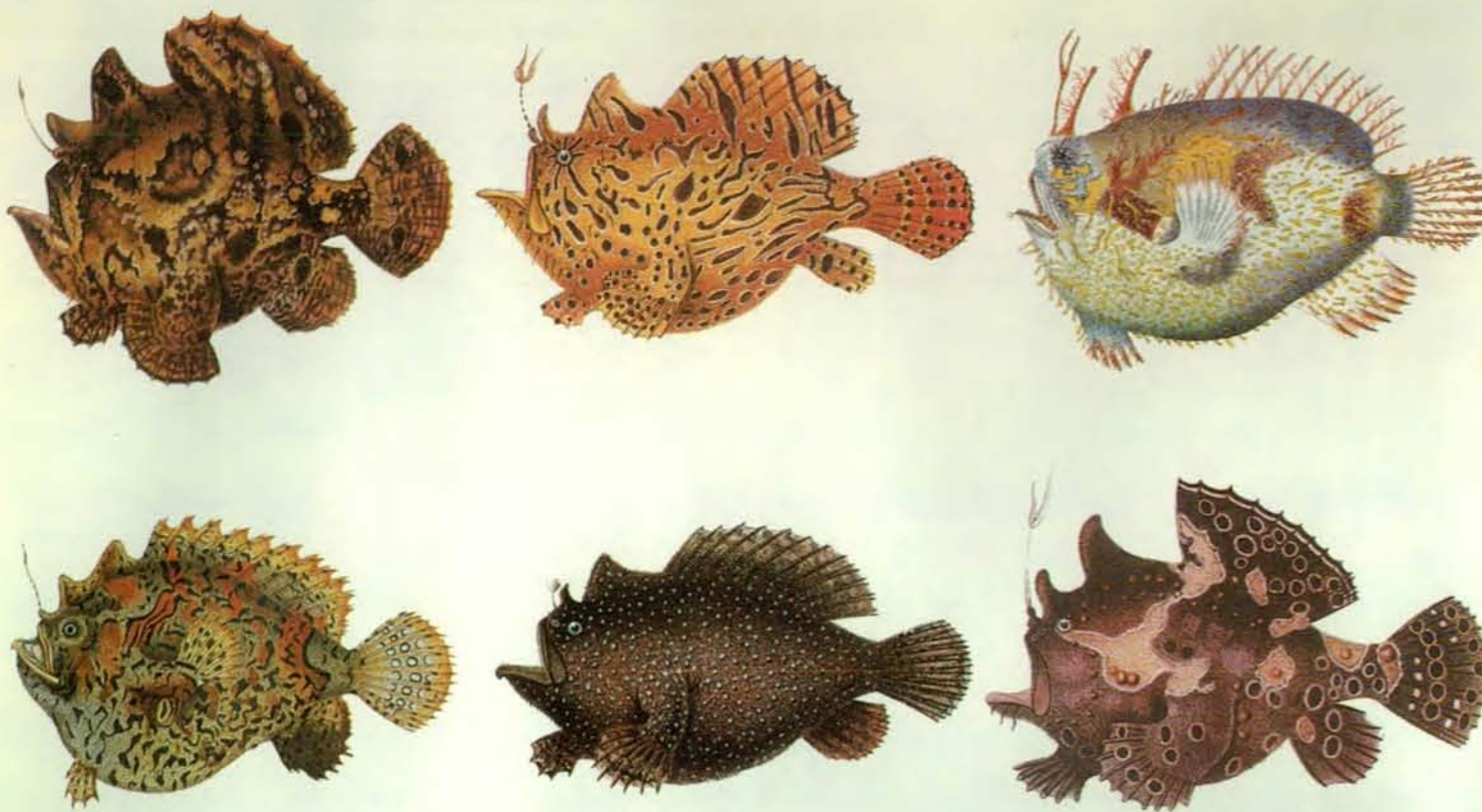
L'affinamento dell'arte del mimetismo ha così conferito ai pesci rana un importante vantaggio evolutivo. Assumendo l'aspetto di oggetti inanimati, i pesci rana non solo sfuggono ai predatori, ma non sono visti neppure dalle loro prede. Inoltre essi hanno una straordinaria abilità nell'attirare la preda facendola giungere fino a portata di bocca grazie soprattutto a una piccola appendice, l'esca, che viene fatta sporgere in avanti appena al di sopra della bocca e può essere fatta oscillare quando la preda viene avvistata.

Già nel 344 a.C. Aristotele descriveva con queste parole l'esca: «La rana pescatrice ha una serie di filamenti che sporgono davanti ai suoi occhi; sono lunghi e sottili come capelli... e sono usati come esca.»

Il pesce rana *Antennarius pictus* vive nelle acque calde e poco profonde che circondano le isole Hawaii. Come tutti gli antennaridi, adesca la preda facendo oscillare una struttura formata da un raggio della pinna dorsale modificato e allungato. Questa struttura (illicio), che nella fotografia si estende diagonalmente verso l'alto tra gli occhi del pesce, termina con un'appendice che funge da esca. Gli animali che sono attirati dall'esca e si avvicinano troppo alle ampie fauci del pesce rana vengono inghiottiti in pochi millisecondi.

Queste osservazioni furono riconfermate nel 1875 dal reverendo S. J. Whitmee delle Samoa, che raccontò di aver osservato il sistema di adescamento del pesce rana: «Esso adescò... alcuni piccoli pesci dell'acquario. Sperai di vederne catturare uno, ma erano troppo diffidenti.»

La descrizione di Whitmee, che fu più tardi confermata da altri, corrisponde a un concetto della biologia comportamentale oggi denominato mimetismo aggressivo. A differenza del mimetismo passivo (grazie al quale il camuffamento, ossia la somiglianza allo sfondo, fornisce un certo grado di protezione da determinati predatori), il mimetismo aggressivo richiede che un animale imiti un oggetto specifico, sia fisicamente sia nel comportamento, per ottenere un qualche vantaggio immediato. In altre parole, imitando non solo un oggetto inanimato, ma anche il comportamento e l'aspetto di qualcosa di commestibile, un pesce rana può attirare una preda nel proprio raggio d'azione, in modo da poterla aggredire.

Gli studi da noi condotti indicano che il pesce rana, con la sua vasta gamma di adattamenti specializzati, è uno dei migliori esempi in natura (anzi il più evoluto) di mimetismo aggressivo.

Tutti i pesci rana appartengono all'ordine dei lofiformi e, in particolare, quelli qui riprodotti fanno parte della grande e diversificata famiglia degli antennaridi che vive nelle acque calde dei mari tropicali. Questi disegni, eseguiti più di 100 anni fa, rappresentano da sinistra a destra, in alto, le specie: *Antennarius commersoni*, *Antennarius striatus*, *Rhycherus filamentosus* e *Antennarius pictus*; nella fila in basso, sempre da sinistra a destra, *Lophiocharon trisignatus*, *Antennarius dorehensis*, un pesce della Nuova Guinea, *Antennarius maculatus* e, di nuovo, *Antennarius striatus*, in una fase di colore differente rispetto a quella arancione della fila in alto.

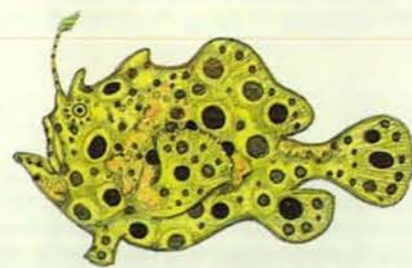
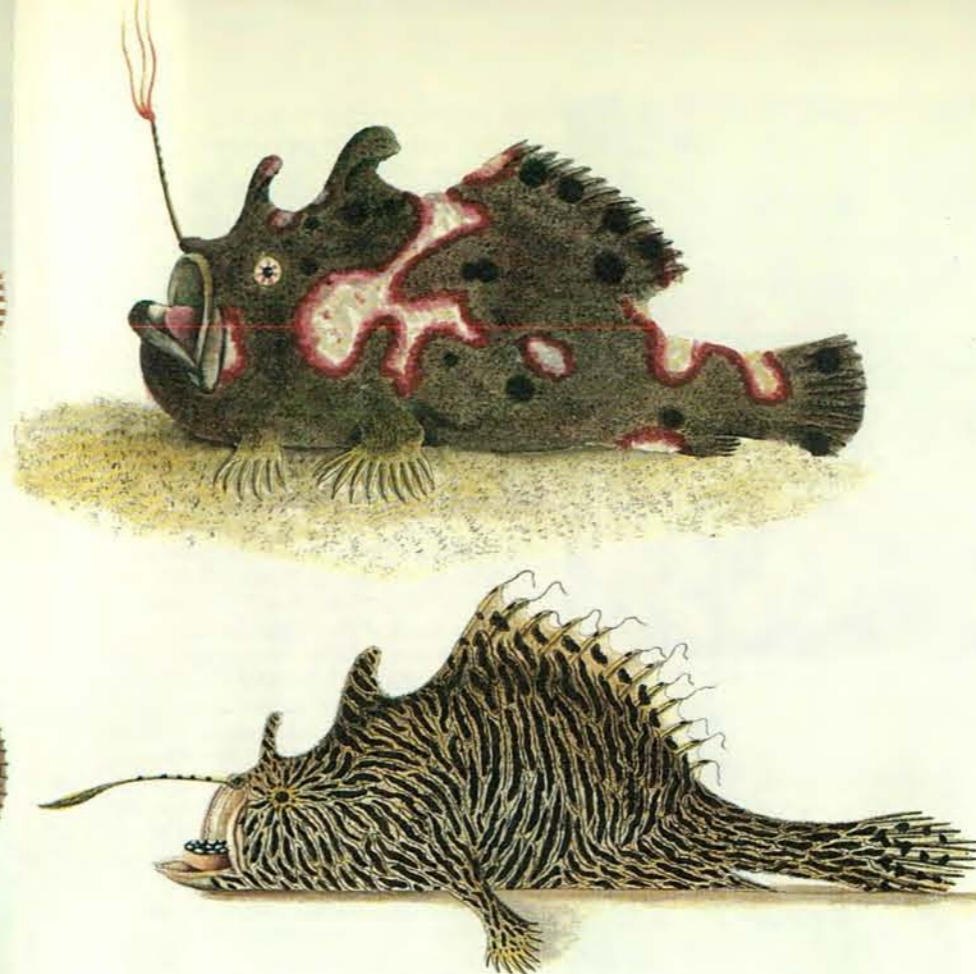
Come abbiamo accennato in precedenza, i pesci rana appartengono all'ordine dei lofiformi, un tempo chiamati pediculati, che raggruppa le famiglie dei lofidi, degli antennaridi e dei ceratidi. In questo articolo descriveremo in particolare gli antennaridi, pesci dai vivaci colori che vivono sui banchi corallini dei mari tropicali. Essi sono caratterizzati dall'avere i raggi delle pinne modificati per espletare un comportamento che li ha resi noti come «pesci pescatori». Come i loro «colleghi» umani, in effetti, questi pesci sono per lo più sedentari e attirano la preda per mezzo di un'esca costituita dall'illicio, un vistoso prolungamento del primo raggio della pinna dorsale che oscilla davanti al capo, imitando il movimento della canna da pesca. In alcune specie l'intera struttura può essere ripiegata in uno stretto solco nella parte superiore del capo, il che consente all'esca di rimanere protetta quando non viene usata.

L'illicio, che varia da specie a specie, è costituito da due parti principali: il raggio stesso e, alla sua estremità, un'appendice carnosa, l'esca. A seconda della specie, l'esca può variare per forma e dimensioni da una semplice pallina di tessuto, di forse un millimetro e mezzo di diametro, a una struttura filamentosa e complicata lunga due centimetri o più. In alcune specie l'esca imita un pesciolino, in altre un crostaceo o un verme.

Sebbene la specie sia ampiamente distribuita nelle acque tropicali e subtropicali di tutto il mondo, inclusi il Golfo di California e il Mar Rosso, la maggior parte degli antennaridi vive nelle aree costiere dell'Indonesia, delle Filippine e di altri gruppi di isole del Pacifico meridionale. Una sola specie, l'arlecchino dei sargassi (*Histrio histrio*), abita fra le alghe del Mar dei Sargassi; le altre vivono o sul fondo dell'oceano (in zone dove l'acqua è bassa o moderatamente profonda) o su rocce o barriere coralline.

La maggior parte dei tassonomisti ritiene oggi che siano circa 41 le specie note di antennaridi, sebbene negli ultimi due secoli ne siano state formalmente descritte 165. Questa confusione tassonomica può essere dovuta in parte alla variabilità del colore e della livrea presentati da una singola specie.

I singoli individui hanno la capacità di «oscillare» tra due fasi di colore: una fase chiara (di solito gialla o fulva) e una fase scura (spesso verde, rosso scura o nera). Sebbene la fase chiara sembri predominare in gran parte degli habitat (per ragioni che non sono ancora evidenti), non è difficile trovare un'area dove sia rappresentata l'intera gamma di colore di una specie.

Per esempio il pesce rana striato, *Antennarius striatus*, presenta almeno quattro distinte fasi di colore: una fase verde, durante la quale assomiglia molto a una roccia coperta di alghe; una fase arancione, in cui assume l'aspetto di una spugna arancione; una bianca, in cui imita una spugna bianca; e una nera, in cui è una spugna nera a essere imitata. Abbiamo supposto che un così deciso cambiamento di colore debba avvenire nel momento in cui il pesce si trasferisce in un habitat leggermente diverso, per esempio in una zona della scogliera corallina dove le spugne arancioni predominano su quelle bianche.

Per verificare la risposta degli antennaridi agli stimoli visivi provenienti dallo sfondo, abbiamo messo a punto un esperimento su due specie: il pesce rana tubercolato, *Antennatus tuberosus*, e il pesce rana di Commerson, *Antennarius commersoni*. Dopo aver posto gli individui in vasche d'osservazione distinte e aver fatto trascorrere un periodo di adattamento, abbiamo cambiato il colore della ghiaia sul fondo (da bianco a nero), aggiungendo anche pezzi di roccia e di corallo in diverse combinazioni di colore. Sebbene il pesce rana tubercolato cambiasse da grigio scuro a bianco crema e il pesce rana di Commerson da giallo limone a rosso mattone, non siamo stati in grado di individuare gli esatti stimoli responsabili del cambiamento di colore. Ovviamente sono necessari ulteriori studi in ambiente naturale.

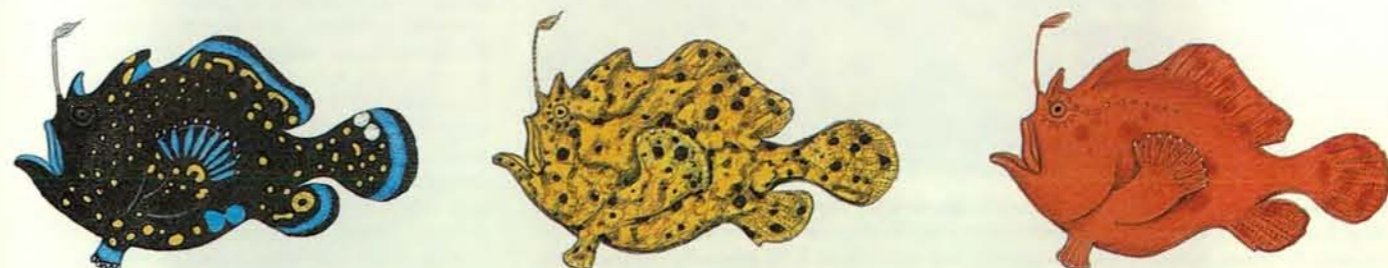
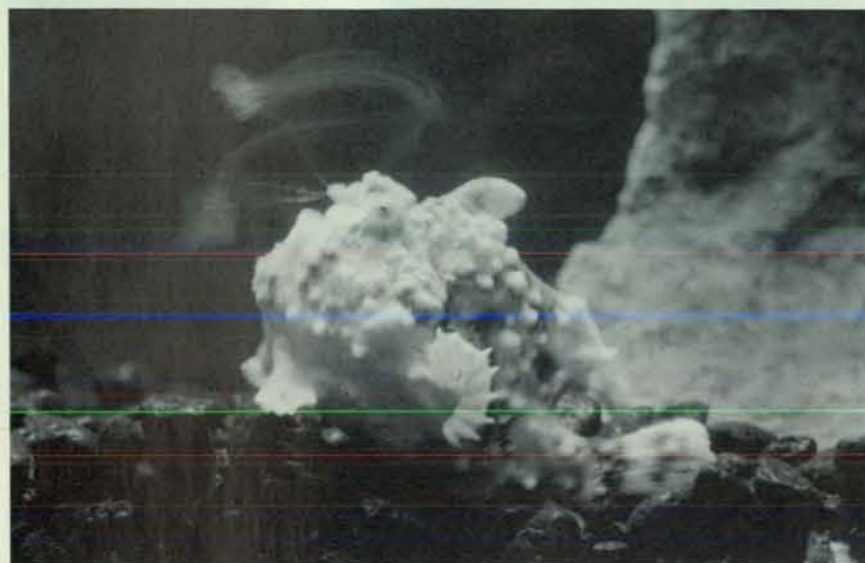
Sappiamo che il pesce rana è un predatore vorace ed efficientissimo. Non fa praticamente alcuna preferenza in fatto di preda: tenta infatti di inghiottire qualsiasi cosa si trovi a portata di bocca, anche animali un po' più grossi di lui. Studiando il comportamento alimentare di questi pesci, abbiamo appurato, per esempio, che un pesce rana può allargare le fauci facendole diventare 12 volte più ampie; per di più può riuscirvi in circa sei millesimi di secondo, un tempo inferiore a quello necessario a un normale muscolo striato per contrarsi. In questi pesci abbiamo analizzato anche il tipo di locomozione che va dal «camminare» sul substrato alla propulsione a reazione.

Gli studi da noi condotti negli ultimi 15 anni sia in laboratorio, sia sul campo al largo delle coste di Oahu, nelle Hawaii, e a Sydney Harbor, in Australia, ci hanno permesso di raccogliere una grande quantità di dati comportamentali ed ecologici per otto diverse specie: il pesce rana di Commerson, il pesce rana striato, il pesce rana tubercolato, il pesce rana ispido (*A. hispidus*), il pesce rana maculato (*A. maculatus*), il pesce rana scarlatto (*A. coccineus*), il pesce rana sanguigno (*A. sanguineus*) e il pesce rana trimaculato (*Lophiocharon trisignatus*).

Abbiamo dato inizio alla nostra ricerca analizzando il comportamento di adescamento; in particolare, volevamo sapere se esso influenza i tipi di preda che un pesce rana cattura. Le esche sono specie-specifiche, cioè ciascuna specie di pesce rana possiede un'esca morfologicamente unica? C'è una correlazione tra l'aspetto dell'esca e la dieta, ossia l'esca imita un cibo che attira in particolare la specie predata?

Sembra che in gran parte delle specie forma e dimensione dell'esca siano caratteristiche; di fatto una specie può spesso essere identificata solo in base all'esca che presenta. L'esca del pesce rana striato assomiglia a un verme policheto, mentre l'esca del pesce rana ispido assomiglia a un verme tubicolo. Al contrario, il pesce rana maculato ha un'esca che simula un piccolo pesce; il pesce rana di Commerson ne ha una simile a un gamberetto.

Tuttavia l'efficacia dell'esca è basata su qualcosa di più dell'aspetto. Un pesce rana deve muovere e far oscillare l'esca in modo da simulare i naturali movimenti di nuoto dell'animale imitato. L'esca simile a un pesce del pesce rana maculato, per esempio, oscilla quando è trascinata nell'acqua e così imita i movimenti laterali oscillanti di un pesce che nuota.

Abbiamo ipotizzato che queste esche morfologicamente differenziate rifletta-

La variazione della pigmentazione può essere molto marcata all'interno di una singola specie di pesce rana. Si pensa che gli individui cambino colore per mimetizzarsi con particolari oggetti del loro ambiente, come rocce, spugne e frammenti di corallo. Qui sono rappresentate solo quattro delle molte fasi di colore e livree del pesce rana *A. pictus*.

Cercando di mimetizzarsi con lo sfondo, in questo caso una roccia incrostata di alghe (*in alto*) il pesce rana *Antennarius maculatus* può rimanere immobile anche per ore in attesa dell'arrivo di una preda. L'estremità dell'illicio, un raggio della pinna trasformato in esca, è diversa da specie a specie: in questo caso simula un pesciolino (*al centro*). Se un'eventuale preda entra nel campo visivo del pesce rana appostato, esso la attira a sé facendo ondeggiare la sua esca (*in basso*) in modo da imitare i movimenti di un pesciolino.

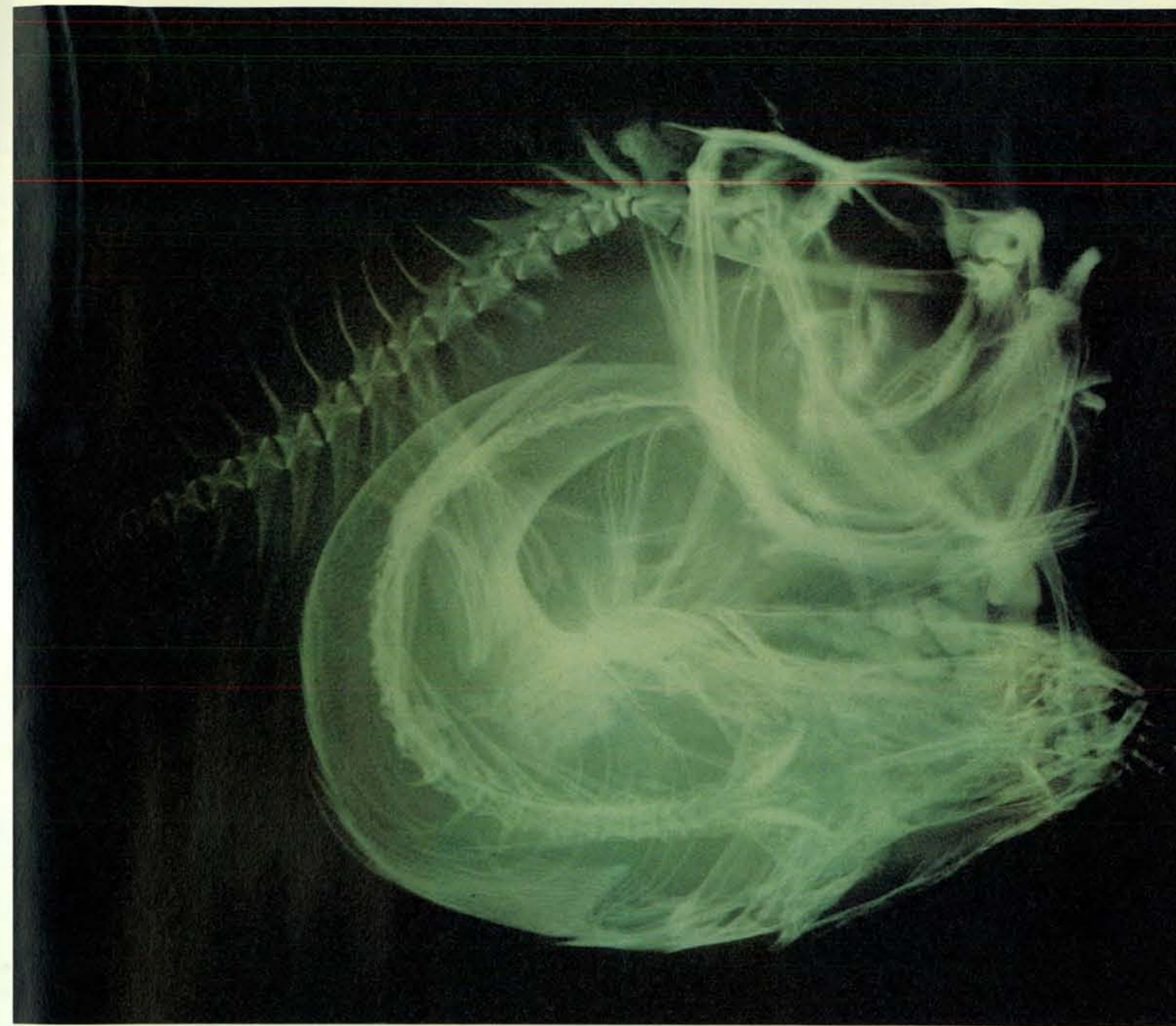
no una dieta altamente specializzata. Dopo tutto, sembra logico supporre che un pesce rana striato, con la sua esca simile a un verme, possa cibarsi principalmente di specie che di norma cacciano policheti o altri vermi marini (e sono perciò le più attirate). Per dimostrare la nostra ipotesi, abbiamo deciso di analizzare i contenuti gastrici di quattro specie: *A. striatus*, *A. pictus*, *A. commersoni* e *Antennatus tuberosus*. Con nostra sorpresa lo studio ha rivelato che i pesci rana non hanno una dieta specializzata, ma si nutrono di prede molto varie.

I nostri risultati erano inattesi. Perché, ci chiedevamo, l'evoluzione favorirebbe queste esche complesse e apparentemente specie-specifiche quando la media dei pesci rana riesce ad attirare un'ampia varietà di prede? Una possibile spiegazione è che l'acquisizione di cibo nell'ambiente marino sia imprevedibile e complessa. Molti individui entrano per caso nella zona d'attacco di un pesce rana senza essere specificamente attratti dall'esca; altri sono attratti non dal movimento dell'esca, ma dal pesce rana stesso, che può essere confuso con un sito adatto (per esempio un pezzo di corallo) sul quale deporre uova, «pascolare» o cercare rifugio.

Un'altra possibilità è che l'esca possa provocare una risposta difensiva o territoriale da parte dei pesci vicini. In un esperimento di laboratorio osservammo che esemplari di *Dascyllus aruanus*, posti nella stessa vasca di un pesce rana, tentavano ripetutamente di attaccare l'esca. In parecchie occasioni, in cui l'aggressività era particolarmente accentuata, un *Dascyllus* entrava nel raggio d'azione del pesce rana e veniva divorato.

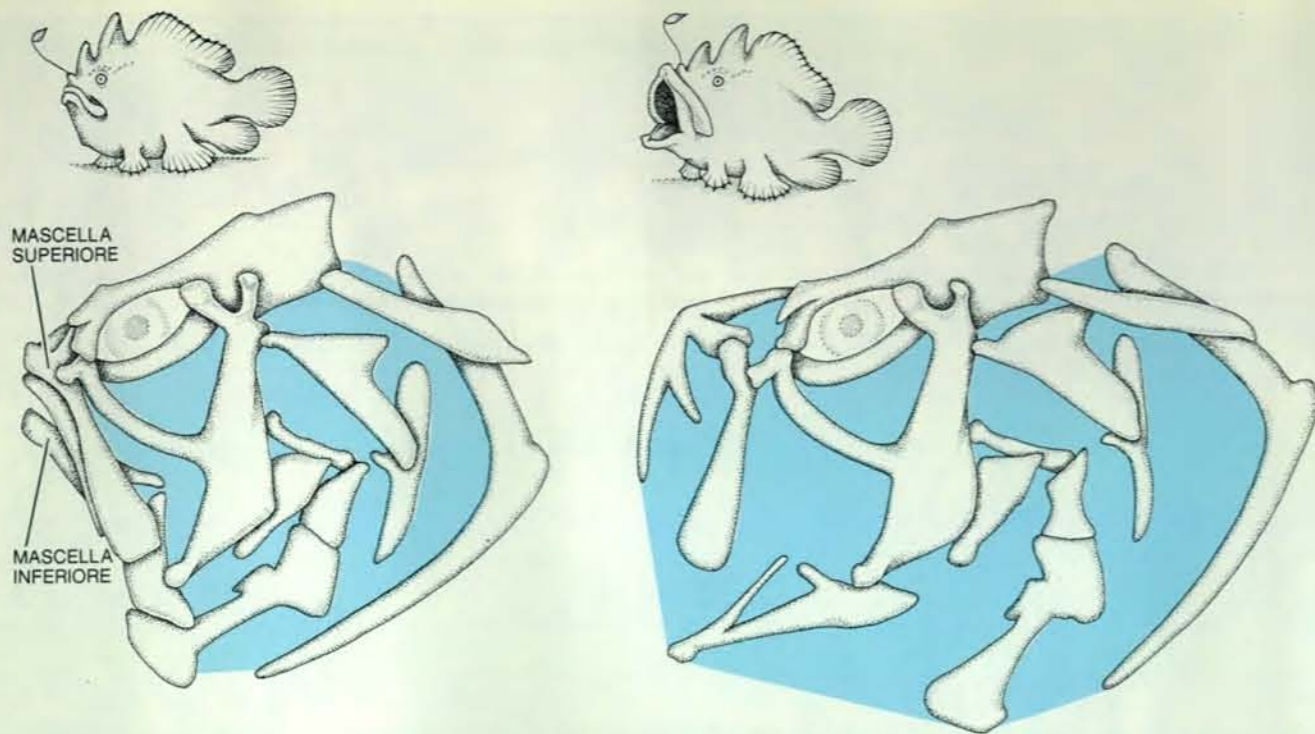
La cattura in queste circostanze è istantanea; in effetti, quasi tutti i pesci che nuotano all'interno della zona d'attacco (un'area il cui raggio è approssimativamente due terzi della lunghezza del pesce rana) hanno poche possibilità di sopravvivenza. Per quanto ne sappiamo, un pesce rana può spalancare la bocca e inghiottire la vittima a una velocità maggiore di ogni altro vertebrato predatore. In effetti, la rapidità nella cattura della preda è forse l'attributo più caratteristico del pesce rana.

Con l'aiuto di tecniche moderne, come la cinematografia ad alta velocità, abbiamo dedicato parecchio tempo ad analizzare i meccanismi dell'alimentazione in tre specie: *A. striatus*, *A. hispidus* e *A. maculatus*. Integrando le analisi fotogramma per fotogramma del filmato girato ad alta velocità (da 800 a 1000 fotogrammi al secondo) con lo studio anatomico delle ossa, dei muscoli e dei legamenti del capo del pesce, abbiamo compreso che la cattura della preda nel pesce rana avviene con una sequenza di comportamenti altamente preordinata.

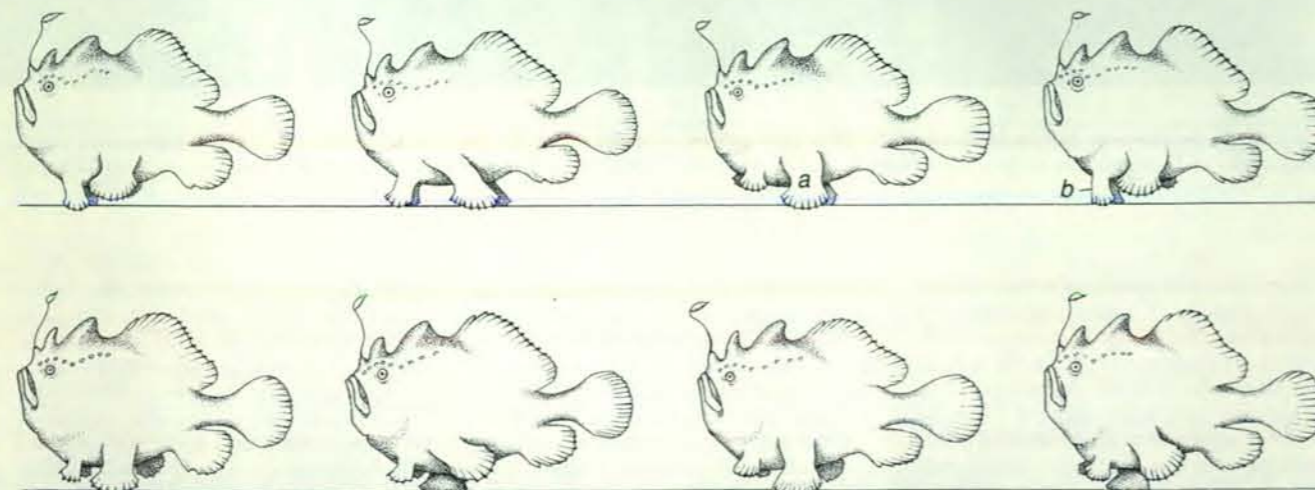
Si possono individuare tre fasi funzionalmente distinte. La prima consiste nel comportamento di pre-attacco, la seconda è l'attacco vero e proprio e la terza è

La radiografia consente di vedere che il pesce rana *Antennarius multiocellatus* ha inghiottito un pesce scorpione (*Pontinus sp.*) più lungo di lui. Un pesce rana è in grado di inghiottire grosse prede perché l'apertura delle sue fauci può allargarsi anche di 12 volte.

l'ingestione della preda. Durante la fase di pre-attacco le prede sono seguite a vista fino a che giungono a una certa distanza dal pesce rana (circa sette volte la lunghezza del corpo). A quel punto il pesce rana comincia a muovere l'esca. Se la preda risponde avvicinandosi, il pesce rana entra in fase di attacco. Se la preda non reagisce il pesce rana può cominciare a muoversi verso di essa, rapidamente all'inizio, poi molto più lentamente. Durante l'avvicinamento lento il pesce rana si appiattisce, rendendosi così presumibilmente meno visibile alla vittima designata. Quando la preda dista circa quanto la lunghezza del corpo del pesce rana, questo, ora in fase d'attacco, si orienta, torcendo o facendo oscillare il corpo fino a raggiungere la posizione più adatta.

Il predatore attende quindi che la vittima entri nella sua zona d'attacco, poi solleva il capo e spalanca la bocca abbassando la mascella inferiore e sollevando quella superiore. In questa configurazione le fauci si comportano come il tubo di un aspirapolvere. Fatta entrare in bocca la preda, il pesce rana passa alla fase di ingestione. Con la preda viene ingerita anche una grande quantità di acqua che ne facilita il passaggio attraverso l'esofago. Quando l'inghiottimento è ultimato, l'acqua in eccesso viene espulsa attraverso le branchie e uno sfintere muscolare alla base dell'esofago si chiude, impedendo alla preda di fuggire.

Questo metodo di cattura della preda, praticato da gran parte dei pesci, è denominato «alimentazione a trappola aspirante». Il principio che sta alla sua

La bocca del pesce rana rimane chiusa (*a sinistra*) fino a quando una preda adeguata giunge alla distanza adatta per l'attacco. Il pesce rana allora contrae i muscoli del corpo e l'esofago, determinando il sollevamento del capo e l'apertura della bocca (*a destra*); le stesse contrazioni muscolari spingono verso l'esterno la mascella superiore e verso il basso l'inferiore. Allargandosi, la bocca si estende in avanti (un processo che richiede solo sei millesimi di secondo circa), consentendo al pesce rana di inghiottire la sua vittima.

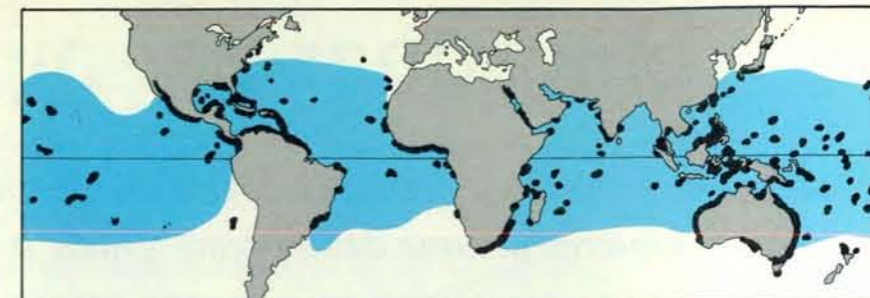
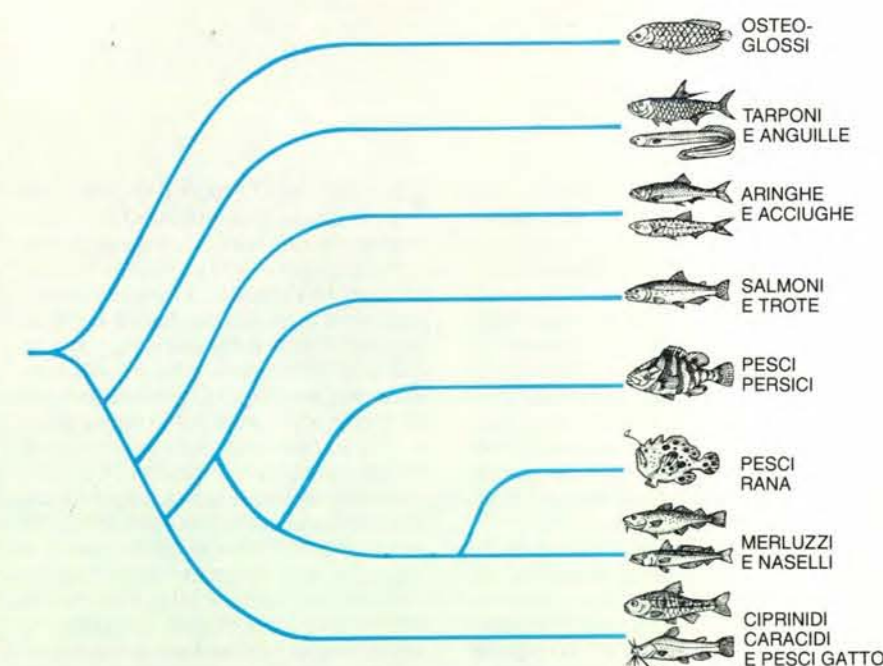
base è semplice: la rapida espansione della cavità branchiale e della bocca crea una pressione negativa (aspirazione) che determina un flusso d'acqua verso l'interno, aumentando così la velocità d'inghiottimento della preda. Diversamente dai predatori che nuotano velocemente e accelerano per inghiottire la preda, i predatori in agguato fanno affidamento sulla rapida espansione della cavità orale per sorprendere e catturare la propria vittima. Il predatore a trappola aspirante può anche inghiottire la preda senza far notare la sua presenza ad altre potenziali vittime. Per esempio, pesci che nuotano anche molto vicini sembrano spesso non accorgersi dell'improvvisa scomparsa di uno di loro, rimanendo così vulnerabili a nuovi attacchi da parte del predatore in agguato.

La differenza tra i pesci rana e gli altri pesci consiste nel grado di apertura della bocca oltre che nella sua velocità di espansione. Abbiamo dimostrato, iniettando paraffina liquida in bocche sia chiuse, sia completamente spalancate di pesci conservati, che i pesci rana possono espandere la bocca fino a un'ampiezza molto maggiore di altri pesci che usano la trappola aspirante. Il pesce persico, *Perca fluviatilis*, per esempio, può allargare di sole sei volte le fauci quando inghiotte la preda.

I pesci rana si muovono sul substrato con l'aiuto di pinne simili a zampe, o appoggiandosi alle pinne come se fossero stampelle (*in alto*) oppure «camminando» su di esse (*in basso*). Quando si muove con l'andatura mostrata in alto, il pesce avanza sorreggendosi sulle pinne pettorali (*a*) mentre le pinne pelviche (*b*) sopportano il peso dell'animale solo finché le pinne pettorali sono state riposizionate. Quando cammina il pesce rana sposta le pinne pettorali facendo avanzare prima l'una poi l'altra, più o meno come fa un uomo.

Inoltre la bocca del pesce rana si espande con incredibile rapidità. Le analisi di filmati girati ad alta velocità indicano che il pesce rana ispido apre la bocca e inghiotte la preda in meno di sei millisecondi. Tempi simili sono stati misurati per il pesce rana striato e il pesce rana maculato. In confronto, il pesce pietra, *Synanceia verrucosa*, che è ritenuto il secondo più veloce predatore a trappola aspirante, impiega 15 millisecondi per inghiottire il boccone e il pesce persico ne impiega addirittura 40.

Ci siamo interrogati sul meccanismo che consente questa straordinaria velocità. Le fauci dei pesci rana sono particolari? Hanno una muscolatura diversa da quella degli altri pesci? Che cosa spiega questa abilità nella cattura della preda? Per rispondere a queste domande abbiamo sezionato la testa di esemplari di parecchie specie e abbiamo esaminato attentamente i muscoli responsabili dell'apertura delle fauci. I risultati ci hanno sorpreso: non ci sono differenze strutturali significative tra i muscoli della bocca dei pesci rana e quelli di altri vertebrati. Inoltre non abbiamo trovato alcuna notevole differenza nella struttura ossea.

Dobbiamo ancora stabilire come i pesci rana riescano a spalancare la bocca così rapidamente e, circa il meccanismo operante, non possiamo spingerci oltre le congetture. Forse potrebbe trattarsi dello stesso sistema che consente alle pulci di immagazzinare energia elastica nel torace e saltare a incredibili altezze (si veda l'articolo *Il salto della pulce* di Miriam Rothschild e altri in «Le Scienze» n. 66, febbraio 1974). È possibile che i pesci rana abbiano un meccanismo a catapulta nella mascella che permetta loro di immagazzinare energia elastica e di liberarla poi rapidamente? Pensiamo di sì, ma per confermare la nostra ipotesi occorreranno ulteriori studi.

La famiglia degli antennaridi possiede molti altri adattamenti complessi e affascinanti come le inconsuete forme di locomozione. Per spostarsi sul substrato, sia per inseguire la preda, sia alla ricerca di un nuovo rifugio, essi fanno assegnamento su due tipi di andature simili a quelle dei tetrapodi. Una fa pensare a una persona che si appoggi su stampelle: le pinne pettorali (come stampelle) sopportano il peso del corpo del pesce quando questo si muove in avanti; solo al termine del movimento il peso è trasferito brevemente alle pinne pelviche. L'altra andatura assomiglia superficialmente alla locomozione dei vertebrati terrestri, che avanzano muovendo gli arti in alternanza. Le pinne pettorali forniscono la spinta per camminare, mentre le pinne pelviche servono solo per stabilizzare il pesce. I pesci rana possono naturalmente anche nuotare, facendo ondeggiare il corpo mentre si muovono. Inoltre, ingerendo grandi quantità di acqua e poi facendola uscire con forza attraverso le aperture branchiali, possono ottenere una sorta di propulsione a reazione.

La distribuzione geografica degli antennaridi comprende i mari tropicali e subtropicali. Essi sono più abbondanti nelle acque costiere dell'Indonesia, delle Filippine e di altri gruppi di isole del Pacifico meridionale. Poche specie si trovano a nord o a sud della regione indicata in colore sulla cartina; la maggior parte di questi pesci rana preferisce aree dove la temperatura media annuale alla superficie dell'acqua è superiore a 20 gradi Celsius.

Questo diagramma delle relazioni evolutive esistenti tra i pesci ossei (teleostei) mette in evidenza come i pesci rana siano più strettamente imparentati con i merluzzi e i naselli.

I meccanismi ultrarapidi di alimentazione, i sistemi di propulsione a reazione e di mimetismo aggressivo non sono esclusivi dei pesci rana; ciascuno di questi adattamenti si può trovare in un'ampia gamma di specie ittiche. Tuttavia in nessun altro gruppo si trovano integrati in un solo organismo tanti adattamenti così altamente evoluti e complessi. Non è solo la capacità di adescare la preda o di cambiare colore o di trascinarsi sul substrato a rendere questi pesci così interessanti. Più importante, forse, è il fatto che la selezione naturale abbia favorito l'evoluzione di tante specializzazioni all'interno di un singolo gruppo di pesci. Comprendere i peculiari adattamenti morfologici e comportamentali di questi imitatori aggressivi è certamente una sfida che continuerà a impegnare i ricercatori negli anni a venire.

BIBLIOGRAFIA

ALEXANDER R. McN., *Mechanics of the Feeding Action of Various Teleost Fishes* in «Journal of Zoology», 162, parte 2, ottobre 1970.

GROBECKER DAVID B. e PIETSCH THEODORE W., *High-Speed Cinematographic Evidence for Ultrafast Feeding in Antennariid Anglerfishes* in «Science», 205, n. 4411, 14 settembre 1979.

GROBECKER D. B., *The "Lie-in-Wait" Feeding Mode of a Cryptic Teleost*, Synanceia verrucosa in «Environmental Biology of Fishes», 8, n. 3/4, pp. 191-202, 1983.

PIETSCH THEODORE W. e GROBECKER D. B., *Frogfishes of the World: Systematics, Zoogeography, and Behavioral Ecology*, Stanford University Press, 1987.

Il biosonar dei pipistrelli

È un sistema che fornisce informazioni estremamente dettagliate per il volo e per l'intercettazione della preda, grazie a elaborazioni che hanno luogo nella corteccia uditiva dove vi sono neuroni altamente specializzati

di Nobuo Suga

Secondo un'idea molto diffusa, ma errata, i pipistrelli si servirebbero, per orientarsi e per localizzare la preda, di un sistema alquanto grezzo basato su impulsi sonori; più o meno l'equivalente acustico del cercare al buio il cammino servendosi di un bastone. In realtà il sistema di biosonar dei chirotteri è altamente sofisticato: mediante l'ecolocalizzazione, un pipistrello può inseguire e catturare una falena in volo con una facilità e una precisione che farebbero invidia a qualunque esperto di sistemi aerospaziali militari.

Oltre a fornire informazioni sulla distanza di un bersaglio, il sonar dei chirotteri può rilevare particolari di notevole importanza. Gli spostamenti Doppler (variazioni di frequenza dell'eco rispetto al segnale originale) danno informazioni non solo sulla velocità relativa di un insetto in volo, ma anche sul battito delle sue ali. L'ampiezza dell'eco, assieme al suo ritardo, dà indicazioni sulle dimensioni complessive del bersaglio, mentre le ampiezze delle frequenze componenti corrispondono alle dimensioni delle diverse parti del bersaglio. La differenza con cui i due orecchi percepiscono l'intensità del suono e il suo tempo di arrivo danno l'azimut del bersaglio, mentre il quadro di interferenze creato dalle onde sonore riflesse all'interno della struttura dell'orecchio esterno ne dà la quota.

Le complesse elaborazioni necessarie per estrarre queste informazioni si svolgono in un cervello delle dimensioni di una nocciolina. Negli ultimi 27 anni ho studiato con i miei collaboratori i meccanismi nervosi che presiedono alla capacità di ecolocalizzazione dei pipistrelli. Per le loro caratteristiche, i chirotteri si prestano molto bene allo studio dei meccanismi tramite i quali viene elaborata l'informazione nel loro sistema uditivo. Meccanismi analoghi sono senza dubbio utilizzati anche da altri animali.

Esistono oggi in tutto il mondo circa 800 specie di microchirotteri - il sottordine che riunisce i chirotteri di dimensioni più piccole - e si presume che tutte abbiano la capacità di ecolocalizzare. Esse vivono in habitat diversi e hanno comportamenti e caratteristiche fisiche pure notevolmente diversi. Variabili sono anche i loro impulsi biosonar, persino tra specie appartenenti allo stesso genere. Gli impulsi rientrano comunque in tre tipi: a frequenza costante (FC), a frequenza modulata (FM) e a frequenza costante e modulata insieme (FC-FM). Gli impulsi FC hanno un'unica frequenza, o tono. Essi si propagano verso il basso e si avvertono come stridii. Gli impulsi FC-FM consistono di un lungo suono costante, seguito da uno stridio in decrescendo: *iiiiiu*. In molti chirotteri i suoni non sono puri, ma composti di una prima armonica fondamentale e di diverse armoniche più elevate (multiple della frequenza fondamentale).

La maggior parte delle specie di chirotteri emette un solo tipo di impulso sonoro. Il vespertilionide *Myotis lucifugus* è una specie «FM»: emette impulsi di frequenza modulata che durano da 0,5 a 3 millisecondi e si propagano decrescendo di circa un'ottava. Il fillostomatide *Pteronotus parnellii* è una specie «FC-FM»: emette lunghi impulsi FC che durano da 5 a 30 millisecondi e che sono seguiti da un breve impulso di frequenza modulata, che dura da due a quattro millisecondi. Varie specie modificano gli impulsi secondo la situazione. Per esempio, il nottilionide *Noctilio leporinus*, il pipistrello pescatore, emette impulsi FC e FC-FM quando è in volo, mentre emette impulsi di frequenza modulata quando va in caccia.

Un lungo impulso di frequenza costante serve in modo eccellente a individuare bersagli le cui dimensioni superino la lunghezza d'onda del segnale, dato che l'energia del suono riflesso è fortemente concentrata in corrispondenza di una frequenza particolare. È anche ideale per misurare gli spostamenti Doppler, mentre non è indicato per localizzare con precisione un bersaglio o per distinguerne i particolari. Per ricavare maggiori informazioni sulle caratteristiche del bersaglio è necessario un numero più elevato di frequenze. I chirotteri sono in grado di allargare la banda di frequenze producendo armoniche ed emettendo impulsi FM, che spaziano su un ampio intervallo di frequenze. Gli impulsi FM contengono anche una maggiore quantità di informazioni sul tempo e, pertanto, vengono utilizzati per calcolare i ritardi della eco e per determinare così la distanza di un bersaglio.

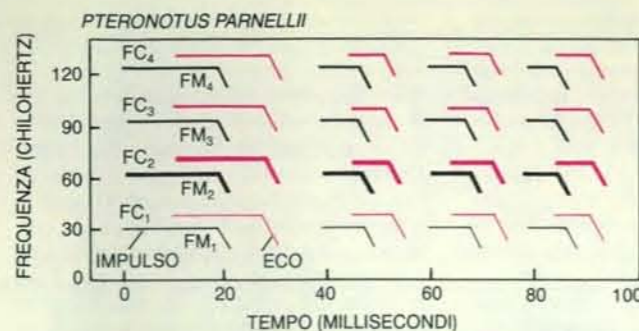
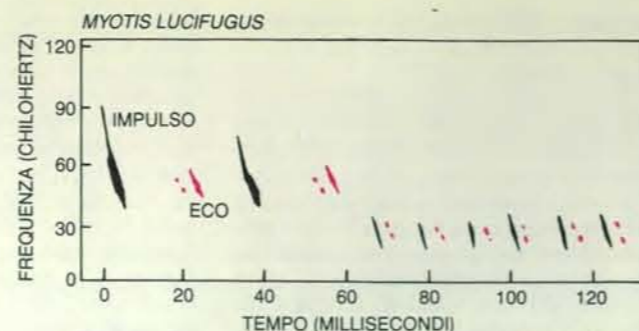
Certe specie di pipistrelli sono in grado di controllare l'energia di ciascuna armonica in funzione della distanza del bersaglio. Se questo è distante, amplificano le armoniche più basse, che vengono attenuate meno dall'aria. Se, invece, il bersaglio è vicino, potenziano le armoniche più alte per ottenere dettagli più fini sul bersaglio. Nell'avvicinarsi alla preda, i microchirotteri accorciano la durata degli impulsi e aumentano la frequenza con cui li emettono, fino ad arrivare a 200 impulsi al secondo, nelle specie FM, e fino a 100 al secondo, nelle specie FC-FM. Questo «aggiustamento» avviene non soltanto perché i chirotteri devono caratterizzare la preda con maggiore dettaglio, ma anche perché quando la distanza tra un chirottero e la preda è piccola, l'angolo sotto cui il predatore rileva la preda varia più rapidamente e, pertanto, il chirottero deve emettere un maggior numero di segnali per seguirla con precisione.

Le strategie e il comportamento di una specie nella caccia sono direttamente correlati alle caratteristiche del biosonar della specie stessa. A loro volta, gli elementi chiave del biosonar si riflettono nell'organizzazione funzionale del sistema uditivo. Da quando, una quarantina d'anni fa, il biosonar dei chirotteri venne identificato da Donald R. Griffin e da Robert Galambos, i neuroetologi si sono dedicati allo studio del sistema uditivo di parecchie specie di chirotteri, anche se, in realtà, la maggior parte si è concentrata su *Myotis lucifugus*, *Pteronotus parnellii* e *Rhinolophus ferrum-equinum*, il ferro di cavallo maggiore. Ognuna di queste tre specie produce impulsi biosonar distinti.

I più attentamente esaminati sono stati i meccanismi uditivi di *Pteronotus parnellii*. I sistemi uditivi biosonar e periferico di questo microchirottero sono stati descritti per la prima volta, rispettivamente nel 1964 e nel 1972, da Alvin Novick e collaboratori della Yale University. Nel 1972, ho avviato le mie ricerche sul sistema uditivo periferico di *P. parnellii* in collaborazione con James A. Simmons, che ora lavora alla Brown University, e sul sistema uditivo centrale con Philip H.-S. Jen, che si trova attualmente all'Università del Missouri a Columbia. In seguito, Toshiki Manabe e Kazuro Kujirai, oggi all'Università di Yokohama, William E. O'Neill, attualmente all'Università di Rochester, e una ventina di altri ricercatori hanno preso anch'essi parte allo studio del sistema uditivo centrale e dei meccanismi nervosi che intervengono nell'elaborazione delle informazioni biosonar in *P. parnellii*. Il presente articolo riporterà principalmente i dati relativi a questa specie.

In volo, questo fillostomatide misura la velocità relativa degli oggetti tramite lo spostamento Doppler degli echi. Quando vola verso un oggetto stazionario, gli impulsi che colpiscono l'oggetto e ne vengono riflessi risultano compressi, il che significa che hanno subito uno spostamento Doppler. Pertanto, l'eco ricevuta dal pipistrello ha una frequenza uniformemente più elevata dell'impulso emesso. Quando l'animale si avvicina, invece, a un insetto che vola, il movimento delle ali dell'insetto introduce spostamenti di frequenza oscillanti, che si sovrappongono allo spostamento Doppler globale come piccole increspature superficiali su un'onda marina.

Certi chirotteri, come *Pteronotus parnellii* e *Rhinolophus ferrum-equinum*,

Il pipistrello *Pteronotus parnellii* scende su uno stagno per abbeverarsi in volo. Il suo biosonar è stato oggetto di numerosi studi.

L'impulso biosonar di *Pteronotus parnellii* consiste di una componente lunga di frequenza costante (FC), seguita da una breve di frequenza modulata (FM). Ogni impulso contiene quattro armoniche (*deponenti*). Quando si avvicina alla preda, l'animale emette impulsi più brevi, di velocità più elevata, pur mantenendo gli stessi toni. *Myotis lucifugus* emette solo stridii di frequenza modulata. Mentre caccia, i suoi stridii sono più corti e più bassi, e hanno velocità più elevata. Ogni specie emette suoni adatti al proprio comportamento.

possono riconoscere le «increspature» dovute al battito delle ali dell'insetto sul fondo degli echi che provengono da oggetti stazionari come, per esempio, la vegetazione o un muro. Come vi riescono? Parte della risposta è contenuta in un espediente, la compensazione dello spostamento Doppler, osservato per la prima volta da Hans-Ulrich Schnitzler dell'Università di Tubinga. *Pteronotus parnellii*, a riposo, emette un suono con frequenza fondamentale di circa 30,5 chilohertz, insieme a tre armoniche superiori; la frequenza «di riposo» della seconda armonica (FC_2) è all'incirca 61 chilohertz. Se individua un'eco con frequenza di 63 chilohertz, che proviene da un oggetto stazionario e che ha subito uno spostamento Doppler, riduce di circa 1,8 chilohertz la frequenza degli impulsi emessi, in modo che gli echi successivi si stabilizzino su una frequenza «di riferimento» di circa 61,2 chilohertz.

I chirotteri citati mostrano di avere una specializzazione che permette loro di analizzare differenze minime nelle frequenze vicine alla frequenza di riferimento. Pertanto, la compensazione dello spostamento Doppler porta la FC_2 dell'eco nell'intervallo in cui il chirottero può scoprire con la massima facilità gli spostamenti di frequenza oscillanti dovuti al battito delle ali dell'insetto.

Questa specializzazione ha la sua origine nell'orecchio interno del chirottero e, in particolare, nella coclea, la struttura che contiene la membrana basale, una lamina lunga e sottile, avvolta a elica come una chiocciola. Quando le onde sonore fanno vibrare il timpano, la vibrazione viene trasmessa alla membrana basale, stimolando le minuscole cellule ciliate presenti in essa. L'eccitazione è trasmessa al cervello, attraverso le cellule del ganglio spirale e le fibre del nervo acustico.

Il segnale nervoso prodotto a livello della coclea deve contenere tutta l'informazione indispensabile per il chirottero. Le proprietà fisiche di un segnale acustico (ampiezza, tempo e frequenza) devono, a loro volta, essere tradotte in attività nervosa. L'ampiezza viene espressa sotto forma di velocità alla quale le fibre del nervo acustico emettono impulsi: quanto più essa è elevata, tanto più alta è la velocità di emissione. La durata dei segnali e l'intervallo tra un segnale e l'altro si riflettono nello schema secondo cui si susseguono gli impulsi nervosi. La frequenza dei segnali viene rilevata in base alla posizione sulla membrana basale: le frequenze elevate fanno vibrare la porzione più vicina al timpano, mentre quelle più basse stimolano porzioni più distanti.

Una porzione della membrana basale di *Pteronotus parnellii* si presenta insolitamente spessa. Questa caratteristica deve essere correlata con l'estrema sensibilità della parte a frequenze comprese tra 61,0 e 61,5 chilohertz (corrispondenti alla FC_2 degli echi dopo compensazione dello spostamento Doppler) come pure con l'insensibilità a frequenze di circa 59,5 chilohertz (corrispondenti alla FC_2 degli impulsi dopo compensazione dello spostamento Doppler). In altre parole, la membrana è intensamente stimolata dagli echi, ma scarsamente stimolata dagli impulsi emessi dal pipistrello stesso.

La selettività delle cellule del ganglio spirale per quanto riguarda le frequenze è estremamente elevata nell'intervallo chiave compreso tra 61,0 e 61,5 chilohertz. Le cellule del ganglio sono sintonizzate su frequenze singole: cioè, ogni neurone ha una frequenza «preferita» (che evoca la risposta massima) e questa frequenza è leggermente diversa da quella dei neuroni vicini. I neuroni sono sintonizzati in maniera così precisa sulle loro frequenze «preferite» da poter rilevare spostamenti dello 0,01 per cento. Gli insetti in volo possono facilmente provocare spostamenti di frequenza portandosi a valori superiori di un ordine di grandezza. Il sistema uditivo periferico è anch'esso ben sintonizzato in modo da poter analizzare spostamenti di frequenza vicini ai segnali FC_1 (30 chilohertz) e FC_3 (92 chilohertz).

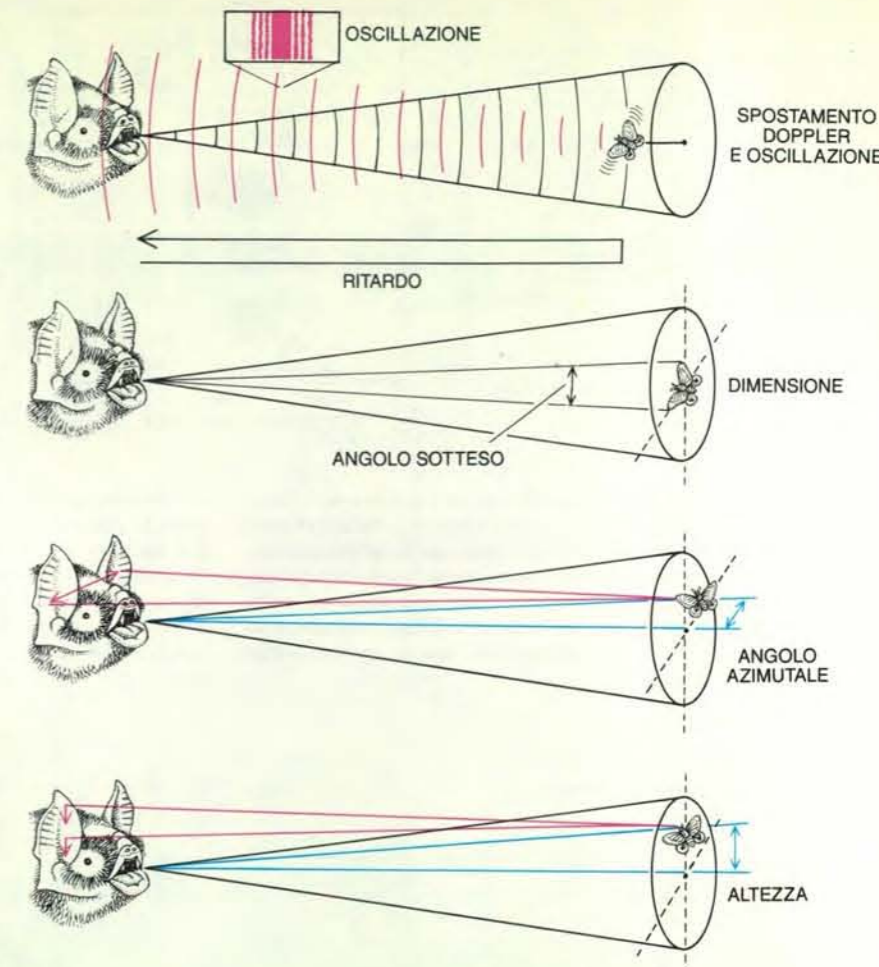
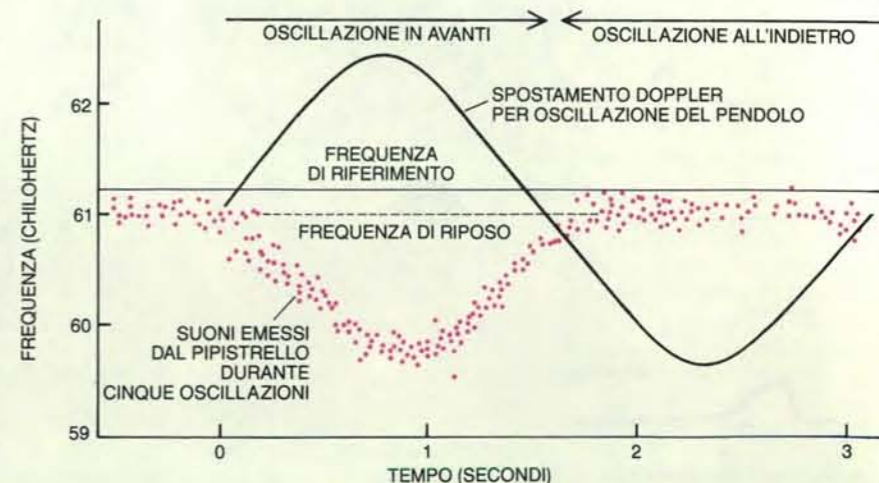
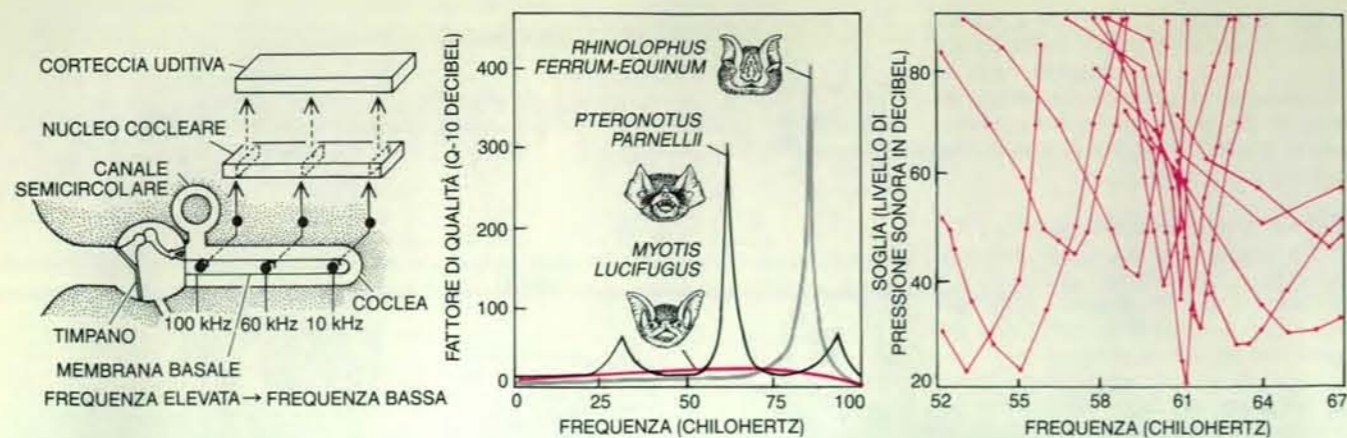
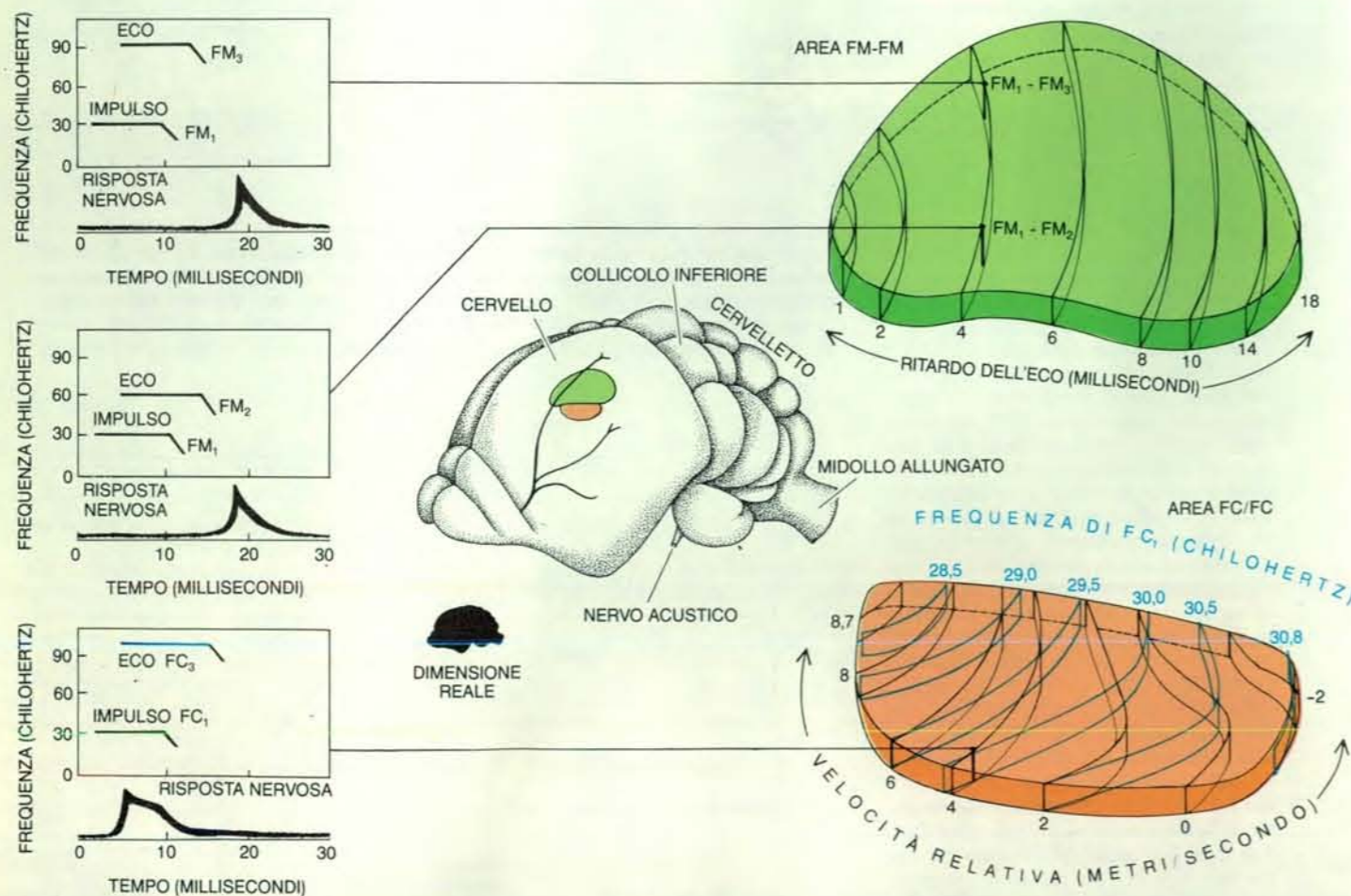
Nella specie *Pteronotus parnellii* la grande sensibilità e la perfetta sintonizzazione del sistema uditivo periferico sulla frequenza del segnale FC_2 si combinano con la compensazione dello spostamento Doppler conferendo all'animale tre vantaggi. In primo luogo, il sistema uditivo periferico ha un'eccellente sensibilità nei riguardi dell'eco di FC_2 (attorno ai 61 chilohertz), mentre non ha alcuna sensibilità all'impulso FC_2 emesso dall'animale (attorno ai 59 chilohertz) durante la compensazione dello spostamento Doppler; pertanto, il mascheramento dell'eco da parte dell'impulso emesso dall'animale è minimo. In secondo luogo, i neuroni dotati di una sintonizzazione così fine sono in grado di individuare il segnale anche quando esso è sommerso da un rumore di fondo. In terzo luogo, l'insieme di neuroni a elevata sintonizzazione ha una grande probabilità di captare l'eco che proviene dalle ali in movimento di un insetto che vola, quando la frequenza dell'eco oscilla verso valori più elevati o più bassi.

Questi vantaggi permettono a *P. parnellii* di cacciare gli insetti, anche tra vegetazione fitta. La compensazione dello spostamento Doppler e la sintonizzazione della frequenza non esistono nei chirotteri FM come *Myotis lucifugus*, che cacciano all'aperto.

Una volta che il segnale acustico è stato codificato come segnale nervoso, deve essere ulteriormente analizzato per poter trarre da esso informazioni del tipo velocità o distanza della preda. Ciò avviene nel sistema uditivo centrale. Partendo dalla coclea, i segnali sono elaborati in sequenza, dapprima a livello del nucleo cocleare e poi via via del lemnisco laterale, del collicolo inferiore, del corpo genicolato medio e, infine, della corteccia uditiva.

Facendo uso di sottili elettrodi in grado di registrare gli impulsi dei singoli neuroni, i miei collaboratori e io abbiamo studiato le risposte dei neuroni del sistema uditivo di *Pteronotus parnellii* a una stimolazione con segnali biosonar. Abbiamo così scoperto un sistema straordinariamente sviluppato atto a elaborare questo genere di informazione. In particolare, abbiamo trovato che i differenti compiti di elaborazione sono affidati a diverse aree della corteccia uditiva, anatomicamente ben distinte. Una regione contiene neuroni che rispondono solo a determinate frequenze e ampiezze degli echi. Una seconda regione risponde solo a differenze di frequenza tra impulsi ed eco.

Di gran lunga la più estesa delle regioni specializzate della corteccia uditiva di *P. parnellii* è quella che elabora i segnali FC_2 dopo lo spostamento Doppler. La regione, chiamata area DSFC, rappresenta solo una stretta banda dell'intervallo di frequenze compreso tra 60,6 e 62,3 chilohertz (la frequenza «a riposo» del chirottero è 61,0 chilohertz). Malgrado questo, essa occupa il 30 per cento della corteccia uditiva primaria. Le frequenze esatte sovrarappresentate sono diverse nei singoli chirotteri e dipendono dalle specifiche frequenze «a riposo». In altre parole, il sistema uditivo di ogni chirottero è «personalizzato».

Un'analoga sovrarappresentazione si trova nel cervello ogniqualvolta il segnale da elaborare abbia un'importanza critica per un particolare comportamento dell'animale. Per esempio, nei gatti e nelle scimmie la corteccia visiva dà una sovrarappresentazione della fovea, l'area della retina in cui l'acuità visiva è massima. La corteccia somatosensitiva dei primati dà una sovrarappresentazione delle zone sensibili al tatto nelle dita. I neuroni dell'area DSFC hanno una sintonizzazione fine per particolari sequenze, superiori perfino a quella dei neuroni presenti nel sistema uditivo periferico. Sono, inoltre, sintonizzati anche sull'ampiezza di un segnale. Pertanto, ogni neurone dell'area DSFC ha una particolare frequenza e una particolare ampiez-

I segnali biosonar possono fornire informazioni di vario tipo. Il ritardo e lo spostamento Doppler dell'eco indicano la distanza e la velocità relativa della preda. Rapide vibrazioni rivelano il battito delle ali di un insetto. L'ampiezza dell'eco dipende dalla dimensione relativa (angolo sotteso) e dalla distanza della preda. Le differenze di tempo e di ampiezza rilevate dai due orecchi danno l'azimut del bersaglio. Le interferenze delle onde sonore riflesse all'interno del padiglione auricolare indicano l'altezza a cui vola l'insetto.

La compensazione dello spostamento Doppler viene dimostrata ponendo un *Myotis lucifugus* su un pendolo. Durante l'oscillazione in avanti, l'animale riduce la frequenza dell'impulso emesso (*in rosso*) dimodoché l'eco mantiene una frequenza di riferimento. L'animale non compensa lo spostamento Doppler durante l'oscillazione all'indietro. Questo esperimento è stato messo a punto da O'Dell W. Henson, Jr., dell'Università del North Carolina.

La membrana basale vibra nella parte esterna con frequenze elevate e nella parte interna con frequenze più basse. Le vibrazioni eccitano le cellule ciliate che a loro volta eccitano quelle del ganglio spirale. Nel grafico al centro si osserva come *Pteronotus parnellii* abbia un'elevata selettività dei neuroni sintonizzati sulle tre armoniche FC più elevate, in particolare a 61 chilohertz (FC_2), ma anche a 30 (FC_1) e a 92 chilohertz (FC_3). Selettività elevata si riscontra anche nei neuroni acustici di *Rhinolophus ferrum-equinum*, sintonizzati sugli 83 chilohertz, l'armonica FC_2 di quella specie. *Myotis lucifugus* produce solo un impulso FM e quindi non ha questi neuroni. Il grafico a destra mostra le soglie di risposta di 12 neuroni di *Pteronotus parnellii*; per ognuno la soglia precipita a una frequenza particolare. La pendenza è molto ripida per i neuroni delle frequenze attorno ai 61 chilohertz, la frequenza dell'armonica FC_2.

Mappe della corteccia visiva di *Pteronotus parnellii* elaborate attraverso misurazioni del ritardo dell'eco (corrispondente alla distanza del bersaglio) e dello spostamento Doppler (corrispondente alla velocità relativa della preda). Nell'area FM-FM, i neuroni disposti lungo le linee nere rispondono a uno specifico ritardo dell'eco. Il grafico in alto mostra la sintonizzazione sul ritardo di sei neuroni FM-FM, ciascuno dei quali risponde a un ritardo e a un'ampiezza specifici. Nell'area FC/FC, i neuroni lungo le linee blu rispondono a una FC_1 specifica, combinata con una FC_2 variabile. I neuroni lungo le linee nere rispondono a spostamenti Doppler. Il grafico in basso mostra la sintonizzazione sulla frequenza del neurone FC_1/FC_2 che dà la massima risposta alla combinazione di due armoniche: una da 29,38 chilohertz e 63 decibel e una da 60,52 chilohertz e 45 decibel.

za alle quali risponde meglio. Questo affinamento della risposta è apparentemente il risultato dell'inibizione laterale, un meccanismo universale nei sistemi uditivi, grazie al quale i segnali inibitori provenienti dai neuroni adiacenti potenziano la selettività di un neurone nei riguardi di uno stimolo particolare.

La corteccia uditiva di *Pteronotus parnellii* ha uno spessore di circa 0,9 millimetri, corrispondente a uno strato di 40-50 neuroni. Quando abbiamo inserito in essa un elettrodo in grado di registrare, abbiamo trovato che tutti i neuroni perpendicolari alla superficie sono sintonizzati su frequenza e ampiezza identiche. Pertanto l'area DSFC ha una «organizzazione colonnare». Questa organizzazione è stata scoperta per la prima volta nel 1959 da Vernon B. Mountcastle della Johns Hopkins University nella corteccia somatosensitiva delle scimmie e successivamente da David H. Hubel e Torsten N. Wiesel nella corteccia visiva dei gatti (si veda l'articolo *I meccanismi cerebrali della visione* di David H. Hubel e Torsten N. Wiesel in «Le Scienze» n. 135, novembre 1979).

Quando abbiamo inserito un elettrodo tangenzialmente alla superficie corticale dell'area DSFC, abbiamo trovato che la frequenza e l'ampiezza preferite si modificano gradualmente a indicare l'esistenza di coordinate frequenza-ampiezza lungo la superficie dell'area DSFC. L'area potrebbe approssimativamente essere rappresentata come una ruota di bicicletta: muovendosi verso l'esterno lungo un raggio, la frequenza preferita dai neuroni aumenta; muovendosi lungo la circonferenza da un raggio al successivo, si modifica, invece, l'ampiezza preferita.

Qual è la funzione dell'area DSFC? I neuroni presenti in essa rispondono esclusivamente all'ampiezza e alla frequenza del segnale FC_2 dell'eco, senza tener conto della frequenza dell'impulso emesso. Quindi è presumibile che questi neuroni siano correlati alla capacità di discriminazione delle frequenze e delle ampiezze, come pure all'identificazione di cambiamenti nella frequenza e nell'ampiezza, determinati dal volo degli insetti.

Secondo esperimenti compiuti di recente da Stephen J. Gaioni, da Hiroshi Rikimaru e da me, se l'area DSFC viene distrutta, un chirottero non è più in grado di discriminare tra differenze minime di frequenza, ma solo tra differenze di una certa entità. L'animale ha bisogno di un tempo doppio per compensare lo spostamento Doppler ed esegue il compito solo a metà. Da questo deduciamo che l'area DSFC sia responsabile della precisione con cui viene eseguita la compensazione dello spostamento Doppler, ma non dell'effettiva esecuzione della compensazione. Non sappiamo ancora come essa sia connessa con le altre regioni responsabili dell'esecuzione della compensazione.

Una funzione importante che conosciamo bene è la percezione della velocità relativa del bersaglio. Per fare questo, il cervello del chirottero deve calcolare lo spostamento Doppler tra l'impulso emesso e l'eco. In altre parole, devono esservi neuroni che «esaminano» la relazione tra le frequenze dei due suoni.

Abbiamo trovato questo tipo di neuroni in una parte della corteccia uditiva che chiamiamo area FC/FC. Essi si possono distinguere in due gruppi: neuroni FC_1/FC_2 e neuroni FC_1/FC_3, ciascuno dei quali forma una regione distinta. Essi sono sensibili al rapporto di frequenza tra armoniche di frequenza costante. In particolare i neuroni FC_1/FC_2 e FC_1/FC_3 reagiscono quando un suono con frequenza tra 28 e 30 chilohertz (FC_1) è accoppiato con un suono la cui frequenza è rispettivamente di 61 chilohertz (FC_2) o di 92 chilohertz (FC_3) circa. (Le frequenze di FC_2 e di FC_3 non sono esattamente doppie o triple rispetto a FC_1, ma sono leggermente superiori per poter compensare lo spostamento Doppler nell'eco.)

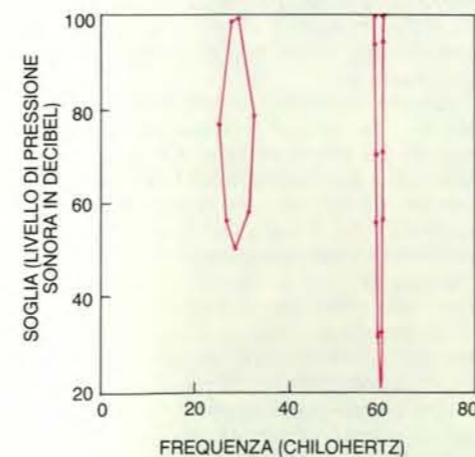
Quando un impulso, un'eco, un segnale FC o un suono FM vengono emessi da soli, i neuroni suddetti rispondono molto debolmente. Ma quando impulso ed eco sono associati, i neuroni rispondono con notevole intensità, divenendo sensibili a segnali accoppiati che sono fino a 6300 volte più deboli dei più piccoli segnali singoli capaci di evocare una risposta.

L'organizzazione funzionale dell'area FC/FC conferma la nostra conclusione che i neuroni in essa contenuti sono deputati, in primo luogo, all'elaborazione delle informazioni che riguardano la velocità. Ogni colonna di neuroni dà la risposta migliore a una combinazione di due frequenze, per esempio 29,6 e 61,2 chilohertz. I neuroni localizzati in un punto leggermente diverso rispondono a una differente combinazione, per esempio a 30,05 e 61,10 chilohertz.

Altre misurazioni hanno dimostrato che la combinazione di frequenze preferita varia in modo regolare lungo la superficie della corteccia. La frequenza preferita di FC_1 aumenta lungo un asse, mentre le frequenze di FC_2 e di FC_3 aumentano lungo un asse che è perpendicolare al primo. In altre parole, la regione FC/FC è organizzata mediante un sistema di coordinate frequenza contro frequenza, in cui ogni punto specifico rappresenta una particolare velocità relativa del bersaglio.

Dato che le armoniche sono semplicemente multipli interi della frequenza fondamentale FC_1, un confronto tra l'impulso FC_1 e l'eco FC_2 o FC_3 permetterà di rilevare lo spostamento Doppler. Per esempio, un neurone particolare può rispondere solo in presenza sia di un impulso FC_1 da 30 chilohertz sia di un'eco FC_2 da 61 chilohertz. Essendo la frequenza dell'impulso FC_2 doppia di quella dell'impulso FC_1, cioè 60 chilohertz, lo spostamento Doppler nell'eco sarà di un chilohertz. Esso comparirebbe se il bersaglio si muovesse a una velocità relativa di 2,8 metri al secondo.

Siamo riusciti a determinare che, nelle regioni FC_1/FC_2 e FC_1/FC_3 vi è un asse che rappresenta le velocità tra −2 e +9 metri al secondo. Ma, ciò che è più importante, un numero spropositato di neuroni rappresenta velocità che vanno da zero a quattro metri al secondo. Queste velocità si instaurano durante attività che hanno un'importanza critica per l'animale, come quando un chirottero sta per posarsi su un ramo o per catturare un insetto.

Trovata l'area FC/FC, volevamo conoscere dove ha origine inizialmente, lungo la via uditiva, il confronto tra le frequenze. Sapevamo già che esso è assente nel sistema uditivo periferico: pertanto deve aver luogo in qualche parte del sistema uditivo centrale. Basandosi

su misurazioni elettrofisiologiche effettuate lungo la via uditiva, John F. Olsen, allora dottorando nel mio laboratorio ed ora alla Stanford University, ha trovato che in certe regioni del collicolo inferiore i neuroni sono sintonizzati su frequenze singole: FC_1, FC_2 o FC_3. I neuroni inviano segnali a una certa regione del corpo genicolato mediano, dove questi segnali sono integrati in modo che i neuroni possano rispondere alla combinazione delle frequenze FC_1 con frequenze specifiche FC_2 o FC_3. Questi neuroni si proiettano quindi sull'area FC/FC della corteccia uditiva.

Finora ho descritto l'elaborazione uditiva soltanto delle componenti FC del biosonar. Ma *Pteronotus parnellii* produce anche un suono FM alla fine della componente FC. A quale scopo? Il segnale FM fornisce la chiave più importante per misurare l'intervallo di tempo tra un impulso e la sua eco e, di conseguenza la distanza da un bersaglio. Il ritardo di un millisecondo dell'eco corrisponde a una distanza di 17,3 centimetri (a una temperatura dell'aria di 25 gradi Celsius). Simmons ha trovato che diverse specie di chirotteri possono individuare una differenza nella distanza compresa tra 12 e 17 millimetri, il che significa che possono discriminare una differenza nel ritardo dell'eco compresa tra 69 e 98 milionesimi di secondo!

Come nell'area FC/FC, l'informazione elaborata, in questo caso il ritardo dell'eco, è rappresentata da una «mappa» in una regione ben distinta della corteccia uditiva, chiamata area FM-FM. In quest'area i neuroni danno solo una debole risposta se un impulso, un'eco, un suono a frequenza costante (FC) o un suono a frequenza modulata (FM) viene loro presentato individualmente; rispondono invece con intensità se un impulso è seguito da un'eco che ha un particolare ritardo. Nei casi estremi un neurone FM-FM può avere una sensibilità all'accoppiata impulso-eco superiore di 28 000 volte a quella che ha all'uno o all'altro dei due segnali, presentati singolarmente.

I neuroni FM-FM confrontano l'impulso FM_1 emesso con l'eco ritardata FM_2, FM_3 o FM_4. Ciascuno dei tre tipi di neuroni sensibili al ritardo dell'eco si raggruppa in una propria suddivisione. Ogni neurone FM-FM è sintonizzato su un particolare ritardo dell'eco e la maggior parte dei neuroni predilige anche una particolare ampiezza dell'eco. Di conseguenza, i neuroni FM-FM sono per lo più sensibili a un bersaglio localizzato a una particolare distanza e con una certa dimensione.

L'organizzazione funzionale dell'area FM-FM conferma la conclusione a cui siamo giunti: l'area è in primo luogo deputata all'elaborazione delle informazioni che riguardano le distanze. Ogni colonna di neuroni risponde a un particolare ritardo dell'eco e le colonne sono disposte in modo che il ritardo preferito aumenti lungo un asse. Su questo sono scaglionati ritardi da 0,4 a 18 millisecondi, o distanze del bersaglio da 7 a 310 centimetri. Il potere di risoluzione di questo insieme di neuroni è probabilmente tale che un pipistrello riesce a percepire una differenza di circa 10 millimetri nella distanza del bersaglio. E difatti gli studi sul comportamento dei chirotteri, eseguiti da Simmons, confermano quest'ipotesi.

La rete nervosa dà origine a neuroni che rispondono a ritardi specifici degli echi. Essa ritarda la risposta a un impulso FM_1, dimodoché arriva a un neurone nel medesimo momento della risposta a un'armonica superiore dell'eco FM, innescando così la reazione di quel neurone. La risposta all'impulso è rallentata da una combinazione di ritardi assonici e sinaptici (l'impulso nervoso impiega un certo tempo a percorrere la fibra). Il fenomeno dell'inibizione può creare ulteriori, maggiori ritardi. In questo esempio il neurone *A* inibisce i neuroni dal 17 al 32; dopo un certo tempo, l'inibizione sparisce, a cominciare dal neurone 17, e i neuroni in breve tempo si eccitano. (I colori più chiari indicano ritardi più lunghi.) La risposta all'eco, invece, si estende a tutti i neuroni simultaneamente.

In che modo le vie uditive danno origine a neuroni sensibili ai ritardi impulso-eco? Alla stessa stregua dei neuroni che rispondono a combinazioni di frequenze, i neuroni sensibili ai ritardi impulso-eco si trovano in primo luogo nel corpo genicolato mediano. Per vedere come essi siano collegati al resto della via uditiva, Olsen li ha trattati con un enzima, la perossidasi del rafano, che si diffonde lungo i nervi. L'enzima si fa strada verso due distinti gruppi di cellule, presenti nel collicolo inferiore, e anche verso l'area FM-FM della corteccia uditiva.

I due gruppi di neuroni collicolari, un gruppo sintonizzato sull'impulso FM_1 e l'altro sulle armoniche superiori nell'eco FM, convergono chiaramente in un unico gruppo di neuroni nel corpo genicolato mediano, creando neuroni sensibili a combinazioni di componenti FM. John A. Butman, dottorando presso il mio laboratorio, ha dimostrato che questa sensibilità alle combinazioni è mediata in grande misura dal recettore per l'acido *N*-metil-D-aspartico. Le proprietà biofisiche di questo recettore fanno sì che la risposta del neurone sia amplificata quando i segnali nervosi coincidono. Pertanto, il recettore esegue l'operazione logica AND (come nella frase «If *A* and *B*, then *C*», se *A* e *B*, allora *C*).

In che modo questi neuroni diventano sensibili ai ritardi dell'eco? Olsen ha trovato che i neuroni FM-FM nel corpo genicolato mediano non reagiscono ai ritardi dell'eco così intensamente come fanno i neuroni FM-FM nella corteccia uditiva; ha trovato, inoltre, che rispondono in qualche misura a impulsi ed eco non accoppiati. È un fatto significativo che essi impieghino sempre più tempo a rispondere all'impulso FM_1 di quanto ne impieghino a rispondere agli echi FM_2, FM_3 e FM_4. Ma ciò che è ancora più importante è che la diversità nella latenza della risposta è identica al ritardo impulso-eco a cui risponde meglio ogni neurone.

Queste osservazioni indicano che esiste un meccanismo interessante per il calcolo dei ritardi dell'eco. Quando un chirottero ascolta l'impulso FM_1 che ha emesso, la risposta che il suo sistema nervoso invia verso il corpo genicolato mediano è ritardata, mentre non lo è la risposta all'eco. La risposta ritardata all'impulso arriva quindi a un particolare neurone, nel corpo genicolato mediano, nel medesimo momento in cui giunge la risposta non ritardata all'eco. La coincidenza di queste due risposte fa sì che il neurone generi il proprio segnale. Una simile teoria suggerisce l'esistenza di una rete nervosa in cui linee di ritardo multiple formano un insieme di neuroni che risponde a una gamma di eco ritardate.

Dove sono queste linee di ritardo? Nel corpo genicolato mediano o più vicine

Vie parallele elaborano differenti flussi di informazioni biosonar (*a sinistra*). Varie armoniche FC e FM eccitano diverse parti della membrana basale che, attraverso nuclei subcorticali, inviano segnali alla corteccia uditiva. Più in alto nella via uditiva, i neuroni acquisiscono una selettività più stretta per la frequenza e per l'ampiezza. Nella corteccia uditiva primaria le frequenze da 10 a 100 chilohertz hanno una distribuzione tonotopica (*in giallo*); l'estesa area in rosso chiaro, al centro, rappresenta frequenze da 60,6 a 62,3 chilohertz. I segnali FC e FM sono integrati nel corpo genicolato mediano e stimolano neuroni che rispondono a combinazioni specifiche di segnali FC e FM. Questi neuroni sensibili alle combinazioni di segnali inviano i loro assoni verso le aree FC/FC o FM-FM della corteccia uditiva, creando mappe che corrispondono alla velocità (*in arancione*) o alla distanza (*in verde*) del bersaglio.

alla periferia? Avendo notato per la prima volta una diversità nella latenza della risposta agli impulsi e agli echi nei segnali emessi dal collicolo inferiore, abbiamo concluso che alcune linee di ritardo devono trovarsi nel collicolo inferiore stesso. In *Pteronotus parnellii* questa struttura è un nucleo molto sviluppato, che sporge tra il cervello e il cervelletto. Le fibre nervose ascendono dalla porzione ventrolaterale del collicolo alla sua porzione dorsomediale. Gli impulsi percorrono, lungo queste fibre, una distanza di circa due millimetri, eccitando 100 o più neuroni lungo il percorso e introducendo ritardi fino a otto millisecondi.

Si ricordi, tuttavia, che i ritardi nell'area FM-FM della corteccia uditiva sono di 18 millisecondi. Pertanto, le linee di ritardo nel collicolo inferiore non spiegano l'intera gamma di ritardi. I dati suggeriscono che ulteriori ritardi vengano introdotti da sinapsi inibitrici presenti nel corpo genicolato mediano.

Finora ho parlato di come *Pteronotus parnellii* ricavi le informazioni relative alla velocità e alla distanza di un bersaglio. Ma, nel fare questo, ho evitato di affrontare il problema del perché *Pteronotus* emetta una varietà di armoniche. Come mai non gli basta un'unica armonica? Probabilmente perché l'animale deve affrontare anche un altro problema. I chirotteri, infatti, vivono in colonie costituite da centinaia di altri individui e, in qualche modo, devono essere in grado di ricorrere alla ecolocalizzazione senza confondersi. Diversi meccanismi, tra cui l'udito biauricolare, aiutano ad affrontare quello che è uno dei più gravi problemi dei controllori del traffico aereo. Un meccanismo importante dipende dalla prima armonica che è la componente più debole dell'impulso emesso, in quanto contiene meno dell'1 per cento dell'energia totale dell'impulso. In effetti, l'impulso è così debole che gli altri chirotteri riescono a mala pena a sentirlo. Praticamente quelle che un chirottero in volo riesce a sentire degli impulsi emessi dai suoi vicini sono le armoniche più elevate. Combinazioni di queste armoniche, tuttavia, non riescono a eccitare i neuroni FM-FM o FC/FC. Quando però un chirottero emette un impulso, può udire la sua prima armonica, che è trasmessa dalle corde vocali all'orecchio tramite il tessuto circostante. Questo suono, associato ad armoniche superiori, che hanno subito un ritardo o uno spostamento Doppler, può allora stimolare i neuroni FM-FM o i neuroni FC/FC. In questo modo, l'elaborazione nervosa dei segnali biosonar è schermata dalla cacofonia degli echi generati dalla colonia.

La soppressione della prima armonica conferisce un altro vantaggio importante. Molte specie di falene, per evitare di essere divorate dai chirotteri, hanno «rivelatori» o recettori acustici per questi animali, estremamente sensibili a suoni compresi tra 15 e 40 chilohertz, ma relativamente insensibili a frequenze superiori. Sopprimendo la prima armonica, che è compresa tra 24 e 31 chilohertz, uno *Pteronotus parnellii* può avvicinarsi di più alle falene senza allarmarle.

L'udito ha, per i chirotteri, la stessa importanza che ha la visione negli animali dotati di un orientamento visivo. Pertanto, non sorprende di trovare

esempi di raffinate elaborazioni compiute, nei chirotteri, da neuroni presenti nella corteccia uditiva. Ma il suono è importante, sotto il profilo biologico, anche per molti altri animali che forse sono dotati degli stessi meccanismi nervosi.

Robert R. Capranica della Cornell University e Albert S. Feng dell'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign hanno trovato che le rane elaborano suoni complessi, per esempio richiami sessuali per l'accoppiamento, mediante neuroni che rispondono a combinazioni di due elementi che fungono da segnale essenziale. Daniel Margoliash dell'Università di Chicago ha osservato la presenza di neuroni analoghi negli uccelli canori. L'elaborazione di suoni d'importanza fondamentale sotto il profilo biologico da parte di neuroni sensibili alle combinazioni risulta quindi un meccanismo nervoso notevole, presente in animali molto diversi.

Probabilmente il sistema uditivo umano utilizza anch'esso questi insiemi di neuroni per elaborare i suoni che costituiscono le parole. Anche se l'elaborazione della parola è un fatto unico ed è prevalentemente una funzione esercitata dai centri superiori della corteccia cerebrale, le regioni uditive subcorticali, con i loro neuroni sensibili alle combinazioni, possono analizzare i suoni che costituiscono il linguaggio in misura superiore a quanto generalmente si pensava. Il lavoro avviato da Mountcastle, Hubel e Wiesel è valso a dimostrare che meccanismi analoghi sono alla base dell'attività della corteccia somatosensitiva e della corteccia visiva nelle scimmie e nei gatti. La nostra ricerca sulla corteccia uditiva dei chirotteri contribuisce, quindi, non soltanto alla comprensione dell'udito ma anche a quella dei sistemi sensoriali in generale.

BIBLIOGRAFIA

SCHNITZLER H.-U. e HENSON O. W., Jr., *Performance of Airborne Animal Sonar Systems* in *Animal Sonar Systems* a cura di Rene-Guy Busnel e James F. Fish, Plenum Press, 1980.

SUGA NOBUO, *The Extent to Which Biosonar Information Is Represented in the Bat Auditory Cortex* in *Dynamic Aspects of Neocortical Function* a cura di Gerald M. Edelman e altri, John Wiley & Sons, Inc., 1984.

SUGA NOBUO e TSUZUKI KOICHI, *Inhibition and Level-Tolerant Frequency Tuning in the Auditory Cortex of the Mustached Bat* in «Journal of Neurophysiology», 53, n. 4, aprile 1985.

SUGA NOBUO, *Auditory Neuroethology and Speech Processing* in *Auditory Function* a cura di Gerald M. Edelman e altri, John Wiley & Sons, Inc., 1988.

Un'agricoltura alternativa

I tradizionali metodi di conservazione del terreno agrario combinati con le moderne tecnologie possono ridurre la dipendenza dell'agricoltura dai prodotti chimici con risvolti positivi sia ambientali sia economici

di John P. Reganold, Robert I. Papendick e James F. Parr

Fino alla metà degli anni ottanta, tutto il mondo ha invidiato l'agricoltura statunitense per i continui record che quasi ogni anno stabiliva nella produzione e nel rendimento del lavoro. In realtà le aziende agricole degli Stati Uniti avevano sì raggiunto un elevato grado di meccanizzazione e di specializzazione, ma dipendevano massicciamente dai combustibili fossili, dai capitali presi a prestito, dai fertilizzanti chimici e dai pesticidi. Oggi le stesse aziende si trovano a dover fare i conti con una minore produttività del terreno, col deterioramento della qualità ambientale, con margini di profitto sempre più ridotti e rischi crescenti per la salute dell'uomo e degli animali.

Una fetta sempre maggiore della società americana mette in discussione gli impatti ambientali, economici e sociali dell'agricoltura convenzionale. Di conseguenza, sono in molti a cercare di mettere a punto strategie alternative capaci di rendere il sistema agricolo più «sostenibile». Come vedremo, nel termine agricoltura sostenibile si considerano globalmente diverse varianti dell'agricoltura non convenzionale, spesso chiamate organica (o biologica), alternativa, rigenerativa, ecologica o a ridotto impiego di fattori di produzione (macchinari, manodopera, terra, materie prime ecc.) o, più brevemente, a basso *input*.

In effetti, perché un'azienda sia «sostenibile» non basta che sia organica o alternativa; essa deve anche produrre adeguate quantità di prodotti alimentari di alta qualità, proteggere le proprie risorse ed essere nel contempo sicura per l'ambiente e redditizia. Invece di dipendere da mezzi tecnici acquistati come i fertilizzanti, un'azienda sostenibile deve fare il più possibile affidamento sui processi naturali vantaggiosi e sulle fonti rinnovabili disponibili all'interno dell'azienda stessa.

Una agricoltura sostenibile deve affrontare i molti, seri problemi che affliggono non solo la produzione alimentare statunitense, ma anche quella mondiale: elevati costi energetici, contaminazione delle falde, erosione del terreno, perdita di produttività, impoverimento delle risorse energetiche di origine fossile, bassi ricavi aziendali e rischi per la salute umana e per gli habitat naturali. Essa non è tanto una specifica strategia di conduzione agricola quanto un metodo per comprendere le complesse interazioni esistenti all'interno degli ecosistemi agrari.

Nel 1980 l'US Department of Agriculture (USDA) stimava in 20 000-30 000 (l'1 per cento del totale nazionale) gli agricoltori che avevano adottato una forma di agricoltura non convenzionale, per gran parte della quale ora si potrebbe usare il termine sostenibile. Oggi alcuni esperti stimano che la cifra debba essere raddoppiata o triplicata. Gli agricoltori che praticano la conservazione del terreno e riducono la loro dipendenza dai fertilizzanti e dai pesticidi sostengono, in genere, che i loro costi di produzione sono inferiori a quelli delle aziende agricole a gestione convenzionale. Anche se talvolta le rese delle loro aziende agricole sono notevolmente inferiori a quelle ottenibili con tecniche convenzionali, esse sono spesso compensate da costi di produzione inferiori, che portano a uguagliare o a maggiorare il guadagno.

Per comprendere le basi razionali di un'agricoltura sostenibile, bisogna essere ben consapevoli dell'importanza cruciale del terreno. Esso non è uno strumento qualsiasi della produzione, come i pesticidi, i fertilizzanti o i trattori, ma piuttosto un ambiente complesso, vivo, fragile che deve essere protetto e nutrito per assicurarne nel lungo periodo la produttività e la stabilità.

Un terreno in salute, essenziale per l'agricoltura, è un complesso ambiente di vita. La struttura sciolta ma coerente di un buon terreno trattiene l'umidità e favorisce il passaggio dell'aria. Formiche (*a*) e lombrichi (*b*) rimescolano il terreno in modo naturale. I batteri del genere *Rhizobium* (*c*) che vivono nei noduli radicali delle leguminose, come per esempio la soia, fissano l'azoto atmosferico, un elemento essenziale per la vita delle piante. Altri microrganismi del terreno, compresi funghi (*d*), attinomiceti (*e*) e batteri (*f*) decompongono la sostanza organica, determinando la liberazione di maggiori quantità di elementi nutritivi. I microrganismi producono anche sostanze che facilitano l'adesione delle particelle di terreno. Per rimanere sano, il terreno ha bisogno di essere arricchito con sostanze organiche, che sono presenti nei concimi organici e nei residui delle colture.

Un terreno sano è un mondo adatto a favorire la crescita delle colture. L'aria circola liberamente nei suoi pori ed esso trattiene a lungo l'umidità dopo una precipitazione. Un solo cucchiaio di terreno contiene milioni di granuli di sabbia, di limo e di argilla ed enormi estensioni di superfici interne sulle quali possono essere trattenuti gli elementi nutritivi. Quello stesso cucchiaio di terreno contiene inoltre miliardi di microrganismi - batteri, attinomiceti, funghi e alghe - che costituiscono i principali decompositori della sostanza organica. La decomposizione determina la formazione di humus e la cessione di considerevoli quantità di elementi nutritivi alle piante. I microrganismi producono inoltre polisaccaridi, sostanze mucillaginose che avvolgono le particelle del terreno impedendo l'erosione.

Un altro processo fondamentale che ha luogo nel terreno è la fissazione dell'azoto. Alcuni batteri presenti nel terreno o sulle radici di certe piante (soprattutto leguminose) catturano l'azoto atmosferico fissandolo sotto forma di composti che le piante e gli altri organismi possono utilizzare per sintetizzare le proteine. La quantità di azoto disponibile influenza fortemente la produttività del terreno.

L'erosione del terreno, dovuta al ruscellamento superficiale dell'acqua, ha scavato un solco profondo in questo campo nello Stato di Washington. L'asportazione anche di una piccola parte dello strato superficiale del terreno può ridurne la produttività agraria. I metodi agricoli convenzionali spesso favoriscono l'erosione consumando la sostanza organica che conserva la struttura del terreno. L'agricoltura cosiddetta «sostenibile» frena l'erosione perché favorisce l'aggiunta di sostanza organica al terreno e la coltivazione di piante protettive, che ostacolano l'asportazione di materiali terrosi da parte del vento o delle piogge.

Una delle pietre miliari del movimento della «sostenibilità» negli Stati Uniti è *Farmers of Forty Centuries: Permanent Agriculture in China, Korea and Japan* di Franklin King, pubblicato nel 1911. Esso documenta come gli agricoltori di alcune zone dell'Asia orientale abbiano lavorato i campi per 4000 anni senza impoverire il terreno. Questa e altre pubblicazioni d'inizio secolo hanno messo a fuoco gli aspetti olistici dell'agricoltura e le complesse interazioni esistenti all'interno dei sistemi agrari.

Circa nello stesso periodo, l'agricoltura americana attraversava i primi stadi dell'industrializzazione. Si erano sviluppate nuove tecnologie e metodi scientifici per aiutare gli agricoltori a fronteggiare la crescente domanda alimentare di popolazioni urbane in continua espansione. Sostituendo la trazione meccanica a quella animale, per esempio, gli agricoltori riuscirono ad aumentare del 20-30 per cento la superficie cerealicola, potendo arare superfici più estese in minor tempo e non avendo più la necessità di destinare tanto terreno alla produzione di foraggio per il bestiame.

Parecchi agronomi e associazioni continuarono a sostenere che avrebbero dovuto essere la biologia e l'ecologia a governare l'agricoltura e non la chimica e la tecnologia. I loro sforzi contribuirono alla nascita negli anni trenta del movimento per la conservazione del terreno e del movimento per l'agricoltura organica, e a una considerevole mole di ricerche connesse. Ciononostante, verso gli anni cinquanta i progressi tecnologici provocarono uno spostamento dell'agricoltura tradizionale verso un sistema basato su prodotti chimici, nuove varietà di piante agrarie e macchine agricole ad alta intensità di energia, ma in grado di far risparmiare sulla manodopera. Questo è il sistema ora noto come agricoltura convenzionale.

Quando vennero introdotti pesticidi, fertilizzanti a basso costo e varietà di piante ad alta produttività, divenne possibile la monocoltura, ossia la coltivazione su uno stesso appezzamento di terreno, anno dopo anno, della stessa specie agricola, senza depauperare le riserve azotate del terreno né dare luogo a seri problemi di natura parassitaria. Gli agricoltori presero a concentrare i loro sforzi su un minor numero di colture e i programmi economici governativi promossero la monocoltura sovvenzionando esclusivamente la produzione di frumento, di mais e di poche altre importanti colture da granella. Purtroppo, queste pratiche predisposero il terreno all'estendersi dell'erosione e dell'inquinamento idrico da parte dei prodotti chimici impiegati.

Fra il 1950 e il 1985, nel settore agricolo statunitense le voci di bilancio riguardanti gli interessi sui prestiti, le spese in conto capitale e gli acquisti di prodotti come fertilizzanti chimici, pesticidi, macchinari ecc. sono quasi raddoppiati, passando dal 22 al 42 per cento, mentre il costo del lavoro e quello dei fattori di produzione interni all'azienda sono diminuiti dal 52 al 34 per cento. Durante gran parte di questo periodo, la ricerca sui temi dell'agricoltura sostenibile fu piuttosto scarsa per mancanza sia di finanziamenti sia di interesse da parte dell'opinione pubblica.

Verso la fine degli anni settanta, tuttavia, crebbe negli Stati Uniti la preoccupazione per il fatto che il rapido aumento dei costi stava mettendo in difficoltà la maggior parte degli agricoltori. Di conseguenza, il ministro dell'agricoltura Robert S. Bergland commissionò nel 1979 uno studio per accertare l'entità della diffusione negli Stati Uniti dell'agricoltura organica e per chiarire quale tecnologia facesse da supporto a questo tipo di agricoltura e con quali implicazioni economiche ed ecologiche. Lo studio *Report and Recommendations on Organic Farming*, pubblicato nel 1980, era basato su una casistica di 69 aziende agricole organiche distribuite in 23 Stati.

Il rapporto dell'USDA concludeva affermando che l'agricoltura organica è efficiente dal punto di vista energetico, sana per l'ambiente, produttiva e stabile, e tende verso una sostenibilità di lungo periodo. Dalla sua pubblicazione, questo rapporto ha risvegliato un notevole interesse verso l'agricoltura sostenibile nell'opinione pubblica sia nazionale sia internazionale. Le raccomandazioni in esso contenute hanno costituito la base per un'iniziativa di agricoltura alternativa approvata dal Congresso nel Food Security Act del 1985, una legge con la quale si promuovevano ricerche e istruzione sui sistemi agricoli sostenibili.

Il movimento per l'agricoltura sostenibile ha ricevuto un ulteriore impulso nel settembre dello scorso anno, quando il Board on Agriculture del National Research Council ha pubblicato un altro studio, dal titolo *Alternative Agriculture*. Benché discutibile, il rapporto costituisce forse la conferma più importante del successo di aziende agricole che si affidano alle risorse biologiche e alle loro vantaggiose interazioni piuttosto che ai prodotti chimici. Da esso risulta che le aziende agricole ben condotte che coltivano diverse specie agrarie facendo poco o nessun uso di prodotti chimici sono altrettanto produttive, e spesso più redditizie, delle aziende convenzionali. In esso si asserisce inoltre che «... una più estesa adozione di validi sistemi alternativi comporterebbe benefici economici ancora maggiori per gli agricoltori nonché vantaggi ambientali per la nazione».

Le coltivazioni da concimazione verde, che sono interrate con l'aratura o pacciamate sul terreno anziché raccolte per il mercato, arricchiscono il terreno e ne migliorano la futura capacità produttiva. Le leguminose, come il meliloto, di cui si vede qui la pacciamatura, sono adatte a questo scopo perché apportano al terreno azoto fissato per via biologica riducendo il bisogno di concimi azotati sintetici.

L'agricoltura sostenibile non significa un ritorno ai metodi precedenti la rivoluzione industriale; essa combina, piuttosto, le tecniche conservative dell'agricoltura tradizionale con le moderne tecnologie. I sistemi sostenibili utilizzano attrezzature moderne, sementi certificate, pratiche conservative sia per il terreno sia per le acque e le più recenti innovazioni nel campo della nutrizione e dell'allevamento del bestiame. Viene data importanza alla rotazione delle colture, all'arricchimento del suolo, alla diversificazione delle colture e degli allevamenti e alla lotta biologica ai parassiti.

Quando possibile, le risorse esterne - come i prodotti chimici o i combustibili - sono sostituite da risorse disponibili all'interno dell'azienda o nei dintorni. Queste risorse comprendono l'energia solare e quella eolica, il controllo biologico dei parassiti, la fissazione biologica dell'azoto e altri elementi nutritivi ottenuti dalla biomassa o da risorse del terreno. In alcuni casi le risorse esterne possono risultare essenziali per raggiungere la sostenibilità. Di conseguenza, questi sistemi agrari possono differenziarsi notevolmente l'uno dall'altro per il fatto che ciascuno adotta soluzioni diverse al fine di soddisfare specifiche necessità ambientali ed economiche.

Fondamentale in quasi tutti i sistemi di agricoltura sostenibile è la rotazione delle colture, cioè una successione oculatamente scelta di varie colture sullo stesso appezzamento. Quando le colture vengono avvicendate, danno solitamente produzioni che sono dal 10 al 15 per cento più elevate di quelle che si ottengono in regime di monocoltura. Nella maggioranza dei casi le monocolture si possono protrarre solo facendo ricorso a grandi quantità di fertilizzanti e di pesticidi. La rotazione delle colture consente invece di controllare meglio le erbe infe-

Le coccinelle sono predatori naturali degli afidi del pisello e di altri insetti nocivi. I programmi di lotta integrata ora applicati in molte aziende sfruttano il rapporto fra preda e predatore o altri meccanismi biologici per ridurre il bisogno di antiparassitari chimici. Gli agricoltori che adottano la lotta biologica stimolano la proliferazione di microbi e insetti utili come le coccinelle cercando di rendere i propri terreni inospitali agli insetti erbivori.

stanti e gli insetti, evita il diffondersi delle malattie, garantisce una più efficiente messa in circolo degli elementi nutritivi e altri benefici effetti.

Una tipica rotazione settennale potrebbe comprendere tre annate di erba medica con successivo sovescio, seguite da quattro annate di colture da raccolto: una di frumento, una di soia, quindi un'altra di frumento e infine una di avena. Poi il ciclo ricomincerebbe da capo. Nella prima annata di coltivazione il frumento utilizzerebbe parte dell'azoto lasciato nel terreno dall'erba medica; le riserve azotate del terreno sarebbero intaccate molto meno dalla soia, che è una leguminosa; l'avena verrebbe coltivata alla fine del ciclo perché ha minori esigenze nutritive del frumento.

L'interramento regolare dei residui colturali, di letame e di altri materiali organici è un'altra caratteristica fondamentale dell'agricoltura sostenibile. La sostanza organica migliora la struttura del terreno, ne aumenta la capacità di immagazzinamento idrico e ne accresce la fertilità; inoltre rende più soffice il terreno migliorandone le condizioni fisiche. Quanto più soffice è il terreno, tanto più facile è la sua lavorazione, nonché l'emergenza delle piantine e l'approfondimento delle loro radici. L'acqua s'infiltra facilmente nei terreni di buona sofficità, riducendo così al minimo il ruscellamento superficiale e l'erosione. La sostanza organica costituisce inoltre una base alimentare per i lombrichi e per i microrganismi terricoli.

Nei sistemi di agricoltura sostenibile le principali fonti di elementi nutritivi sono i concimi di origine animale e i sovesci. Una coltura da sovescio è una graminacea o una leguminosa che viene interrata o lasciata in superficie alla fine della stagione vegetativa per accrescere la produttività e la sofficità del terreno. I sovesci contribuiscono a controllare le erbe infestanti, gli insetti nocivi e l'erosione del terreno, mentre forniscono foraggio per il bestiame e riparo per le forme spontanee di vita animale.

Allevando specie diverse di piante e di animali, un'azienda agricola può tenere sotto controllo sia i rischi economici sia quelli biologici. La diversità è data dall'insieme di specie e di varietà colturali e dall'integrazione sistematica fra le colture erbacee e arboree e gli allevamenti. Per esempio, quando nel 1988 la maggior parte del North Dakota fu colpita da una grave siccità, molti agricoltori che si erano dedicati alla monocoltura del frumento persero del tutto il raccolto. Quelli che avevano praticato sistemi più diversificati poterono rifarsi con la vendita del bestiame, oppure con i raccolti ottenuti da semine più tardive o da varietà più tolleranti alla siccità. Un sistema produttivo basato sulla diversificazione biologica è inoltre meno esposto ai rovesci economici di un mercato sottoposto all'eccesso di offerta e alla caduta dei prezzi di un singolo tipo di raccolto.

Il controllo degli insetti, delle malattie e delle erbe infestanti senza prodotti chimici rappresenta anch'esso un obiettivo della strategia della sostenibilità, sulla cui praticabilità esistono dati incoraggianti. Viene comunemente chiamato lotta biologica integrata un metodo a largo spettro che cerca di limitare l'uso dei pesticidi; esso può comprendere l'adozione di varietà colturali resistenti alle malattie e mezzi biologici di controllo (come predatori naturali o parassiti in grado di mantenere al di sotto dei livelli di pericolosità le popolazioni di individui nocivi). Gli agricoltori possono inoltre orientare i metodi di lavorazione del terreno, i tempi di semina, le rotazioni e la gestione dei residui colturali o verso l'obiettivo di assicurare un ambiente ottimale per gli insetti che controllano le specie nocive o verso quello di privare gli organismi infestanti del loro habitat. Se si ricorre - sempre come ultimo espediente - ai pesticidi, essi sono distribuiti quando gli individui nocivi sono più vulnerabili o quando è meno probabile che vengano danneggiate le specie utili e i predatori naturali.

I programmi di lotta biologica integrata hanno consentito di ridurre drasticamente l'uso dei pesticidi su colture quali il cotone, il sorgo e le arachidi. Più di 15 milioni di ettari (circa l'8 per cento della superficie agraria degli Stati Uniti) vengono attualmente gestiti con tali programmi, con un guadagno netto annuo di oltre 500 milioni di dollari. Per colture come il mais e la soia invece i vantaggi sono stati meno evidenti.

Le tecniche di lotta biologica sono fra i mezzi più efficaci per il controllo degli insetti dannosi senza dover fare ricorso ai pesticidi. Anche se sono usate da più di 100 anni e sono riuscite a debellare efficacemente agenti nocivi, soprattutto insetti, in oltre 250 progetti realizzati in tutto il mondo, i finanziamenti per questo tipo di ricerca da parte dell'USDA sono stati ridotti.

Ci si chiede se le pratiche di agricoltura sostenibile riusciranno a mantenere la promessa di essere stabili dal punto di vita ecologico, nonché produttive e redditizie. Allo scopo di confrontare sistemi agricoli sostenibili e convenzionali nei loro effetti sulla capacità produttiva del terreno, uno di noi (Reganold), ha condotto con Lloyd F. Elliott e Yvonne L. Unger della Washington State University uno studio sui terreni di due grosse aziende produttrici di frumento. Una era un'azienda di 324 ettari che era stata gestita senza fertilizzanti sintetici e solo con quantità limitate di pesticidi fin dalla prima messa a coltura, nel 1909. L'altra era un'azienda vicina, ad agricoltura convenzionale, di 526 ettari, che era stata messa a coltura nel 1908, ma che era stata trattata con fertilizzanti dal 1948 e con pesticidi fin dall'inizio degli anni cinquanta. L'azienda che praticava un'agricoltura sostenibile adottava una complessa rotazione colturale e metodi di lavorazione volti alla conservazione, mentre l'azienda convenzionale seguiva una semplice rotazione biennale. La prima azienda coltivava inoltre varie specie di leguminose per proteggere il terreno e per il sovescio.

Per effetto delle differenze nei metodi di gestione, il terreno dell'azienda sostenibile conteneva sostanza organica, azoto e potassio in forma utilizzabile dalle piante in quantità significativamente superiori a quelle dell'azienda convenzionale. Esso aveva inoltre una migliore capacità di immagazzinare elementi nutritivi, un più alto tenore idrico, una più vasta popolazione di microrganismi e un maggior contenuto di polisaccaridi. Il terreno era inoltre dotato di una migliore struttura e sofficità e di un maggior spessore (16 centimetri in più) dello strato superficiale utile ai fini della nutrizione vegetale. La differenza nello spessore dello strato superficiale è stata attribuita al fatto che l'intensità dei processi erosivi del terreno era significativamente più elevata nell'azienda convenzionale.

Le rese medie di frumento autunnale per ettaro, fra il 1982 e il 1986, erano state dell'8 per cento inferiori nell'azienda sostenibile rispetto a quella convenzionale. Ciononostante, l'azienda sostenibile era allineata con la produzione media di frumento della regione; infatti, produceva quasi il 13 per cento in più rispetto a un'altra azienda convenzionale, situata nelle vicinanze e dotata dello stesso tipo di terreno. Questa sua redditività, anche dopo quasi 80 anni di agricoltura senza fertilizzanti, può derivare, almeno in parte, dalla riduzione dell'erosione e della conservazione della produttività del terreno.

Benché la conservazione della produttività del terreno sia di grande interesse per gli agricoltori, la maggior parte di essi solitamente sceglie il sistema agricolo in base alla sua capacità di reddito nel breve periodo. Finora i sistemi convenzionali sono parsi più redditizi nel breve periodo di quelli sostenibili. Questo stato di cose non sorprende, in quanto la ricerca e la politica dell'USDA degli ultimi 40 anni hanno notevolmente favorito l'agricoltura convenzionale.

Eppure, la redditività sul lungo periodo dell'agricoltura convenzionale sembra discutibile se vengono presi in considerazione i costi ambientali e quelli sanitari attualmente sopportati dalla società. Se, in un sistema agricolo convenzionale, questi costi indiretti fossero computati fra i costi di produzione, allora i sistemi sostenibili probabilmente risulterebbero più redditizi e più vantaggiosi per la società nel suo complesso.

Uno degli studi più noti sugli aspetti economici dell'agricoltura sostenibile è stato condotto da William Lockeretz, Georgia Shearer e Daniel H. Kohl dell'Università di Washington. Essi hanno messo a confronto l'efficienza energetica e i costi di produzione di numerose coppie di aziende agricole del Midwest degli Stati Uniti, aziende paragonabili, ma l'una organica e l'altra convenzionale. Fra il 1974 e il 1978 l'energia consumata per produrre l'equivalente di un dollaro dalle colture di aziende organiche è stata solamente il 40 per cento di quella consumata dalle aziende convenzionali. Anche se le aziende organiche hanno avuto rese produttive inferiori a quelle delle aziende convenzionali, i loro costi di esercizio sono risultati inferiori all'incirca dello stesso valore. Di conseguenza, gli utili netti ottenuti nei due tipi di aziende sono stati pressappoco uguali in tutte le annate a eccezione di una.

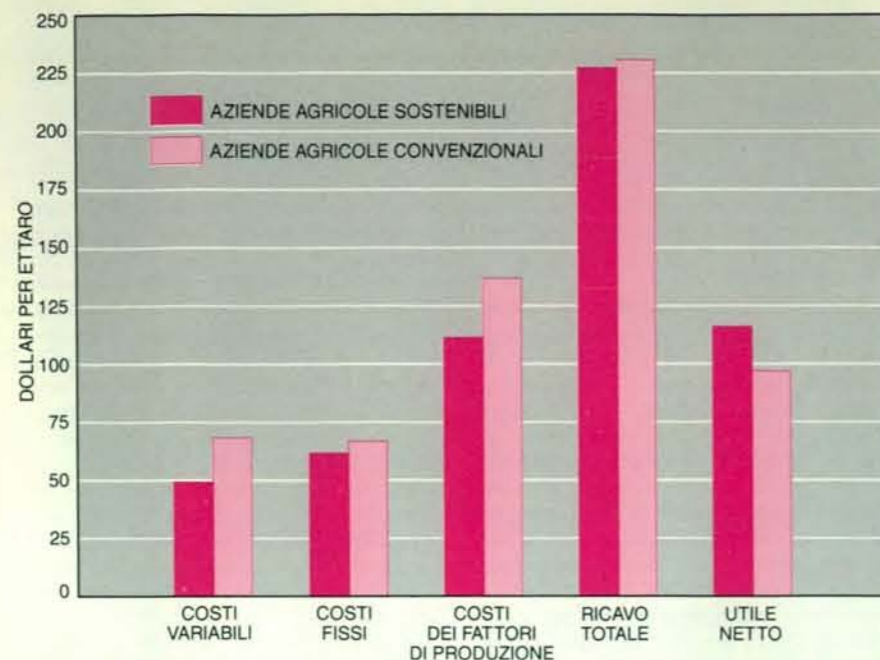
Nonostante questi risultati molto incoraggianti, alcuni agricoltori che erano passati dall'agricoltura convenzionale a quella sostenibile hanno incontrato alcune difficoltà nel breve periodo. Parte dei loro problemi è dipesa dall'aver cessato all'improvviso l'uso di pesticidi e fertilizzanti in tutti gli appezzamenti. Cambiamenti così radicali possono talvolta deprimere le rese per la rapida diffusione delle erbe infestanti, l'aumento esplosivo degli insetti nocivi e una diminuzione di fertilità del terreno che si protrae per qualche anno.

Ricercatori del Rodale Research Center di Kutztown, in Pennsylvania, hanno studiato la transizione dal sistema di agricoltura convenzionale a quello sostenibile e hanno verificato che i risultati sono migliori quando si procede gradualmente. Anche un cambiamento protratto nel tempo può tuttavia comportare piccole diminuzioni nelle rese colturali fino a quando non si instaurano nel terreno nuovi equilibri chimici e biologici. Gli agricoltori dovrebbero cambiare sistema solo in un appezzamento per volta per evitare di esporre a rischi l'intera azienda. Il passaggio all'agricoltura sostenibile risulta inoltre più facile se il terreno viene regolarmente arricchito di sostanza organica mediante letame o sovesci.

Quali sono i fattori che impediscono agli agricoltori di adottare metodi sostenibili? Un ostacolo è rappresentato dai programmi agricoli federali, che solitamente sostengono i prezzi relativi a un ristretto numero di specie coltivate. Il mais e gli altri cereali foraggeri, il frumento, il cotone e la soia assorbono grosso modo i tre quarti di tutte le sovvenzioni economiche che gli Stati Uniti destinano all'agricoltura e queste colture occupano all'incirca i due terzi della superficie agraria coltivata. Il mancato sostegno ai prezzi delle altre produzioni scoraggia gli agricoltori dal diversificare e dall'avvicendare le colture e dal fare ricorso al sovescio, mentre funziona come incentivo alla pratica della monocoltura per massimizzare rese e profitti.

I benefici economici sul lungo termine dell'agricoltura sostenibile possono non essere evidenti per un agricoltore costretto a far fronte al pagamento dei prestiti per i costi di produzione dell'anno in corso. Molti agricoltori che praticano l'agricoltura convenzionale sono fortemente indebitati, soprattutto per gli investimenti in macchine agricole specializzate o in altre attrezzature, e questa situazione economica impedisce loro di passare a metodi più sostenibili. Sinora, la società non li ha né compensati finanziariamente né incentivati in altro modo affinché optino per metodi sostenibili, che pure sarebbero di pubblica utilità.

Oltre a ciò, le informazioni a disposizione degli agricoltori riguardo alle pratiche sostenibili sono scarse. La ricerca finanziata dal Governo statunitense si è dedicata all'agricoltura alternativa in modo del tutto inadeguato e si è invece concentrata sui metodi di produzione imperniati su mezzi agrochimici. Anche l'industria agricola ha pesantemente influenzato il corso della ricerca tramite

La combinazione di colture diverse, o di colture e di allevamenti, rende l'azienda più sostenibile conservando la produttività del terreno e riducendo la dipendenza economica dell'agricoltore da una sola coltura. Nell'azienda qui mostrata, strisce parallele di terreno sono piantate seguendo le curve di livello ad avena (*gialla*) o a mais o erba medica (*entrambi verdi*). In ciascuna striscia le colture vengono avvicendate in un ciclo quadriennale: al mais (una coltura annuale) segue l'avena (pure annuale) e poi l'erba medica (una coltura biennale). Rotazioni di questo tipo rafforzano il controllo delle erbe infestanti, degli insetti e delle malattie, ma migliorano anche la messa in circolo degli elementi nutritivi. La coltivazione a strisce disposte secondo le curve di livello attenua molto i fenomeni erosivi.

Secondo Steven L. Kraten della Washington State University, i profitti delle aziende sostenibili possono superare quelli delle aziende convenzionali. Egli ha trovato che il ricavo totale per unità di superficie nei due tipi di azienda era equivalente, nella media di due annate agrarie, ma poiché nell'azienda sostenibile i costi dei fattori di produzione erano minori l'utile netto risultava superiore del 22,4 per cento. Fra i costi variabili vi sono quelli per i combustibili, la manutenzione dei macchinari, le sementi, i fertilizzanti, i pesticidi e la manodopera. I costi fissi includono le tasse sulla proprietà e gli interessi sui capitali presi a prestito.

sovvenzioni alle università per lo sviluppo di tecnologie di tipo chimico-intensivo destinate a perpetuare la monocoltura cerealicola.

Nonostante che il sostegno legislativo per cambiare il sistema agricolo statunitense vada crescendo, il sostegno finanziario per progetti di agricoltura sostenibile rappresenta ancora solamente una piccola parte della spesa complessiva per l'agricoltura. Il Congresso degli Stati Uniti ha stanziato 3,9 milioni di dollari per l'anno fiscale 1988 e 4,45 per quello 1989 al fine di attuare programmi di ricerca e di istruzione sull'agricoltura sostenibile, secondo i dettami dell'Agricultural Productivity Act, che fa parte del Food Security Act del 1985. Lo stanziamento per il 1990 è stato identico a quello dell'anno precedente - 4,45 milioni di dollari - ma questa cifra rappresenta solamente lo 0,5 per cento degli investimenti totali dell'USDA per la ricerca e l'istruzione.

Il programma per un'agricoltura sostenibile a basso impiego di fattori di produzione (LISA), che ha avuto origine da questo sforzo federale, si prefigge un gran numero di obiettivi: ridurre la dipendenza dai fertilizzanti, dai pesticidi e da altri prodotti che devono essere acquistati dalle aziende agricole; aumentare i profitti aziendali e la produttività agraria; conservare le risorse energetiche e quelle naturali; ridurre l'erosione del terreno e la perdita di elementi nutritivi; e infine sviluppare sistemi di agricoltura sostenibile.

Un rapporto redatto nel 1988 dalla House of Representatives degli Stati Uniti raccomandava che il Congresso modificasse o annullasse alcuni provvedimenti nei programmi di sovvenzione agricola, soprattutto quelli che incoraggiano un maggior uso di prodotti agrochimici e che impediscono l'adozione di metodi a basso input. Lo scorso anno furono presentati al Congresso degli Stati Uniti tre progetti di legge, tuttora in attesa di approvazione, che consentirebbero agli agricoltori l'avvicendamento delle colture e l'adozione di altri metodi alternativi senza perdere le sovvenzioni del Governo federale.

Lo spostamento dall'agricoltura tradizionale verso forme più sostenibili richiederà assai di più che nuove leggi e regolamenti; avrà bisogno anche di maggiore impegno nella ricerca e nei programmi di istruzione pubblica. Le università e l'USDA stanno gradualmente dando maggiore impulso alla ricerca sull'agricoltura sostenibile. Lo scopo prioritario di questa ricerca è la messa a punto di specifici sistemi colturali che producano e consumino azoto con maggior efficienza. È indispensabile conoscere quanto azoto viene fissato dalle leguminose nelle diverse condizioni, come pure individuare i metodi più validi per alternare le leguminose nelle rotazioni delle colture.

Gli Stati Uniti dovrebbero intensificare i loro sforzi nel campo della ricerca anche su altri aspetti delle tecniche agrarie. È necessario ottenere conoscenze più approfondite sulle alternative ai fertilizzanti e sul ciclo degli elementi nutritivi nei diversi ecosistemi agrari. Vanno messe a punto efficienti strategie di lotta biologica per il controllo dei parassiti, delle erbe infestanti e delle malattie. Queste strategie potrebbero ricorrere a insetti e microrganismi utili, combinazioni colturali allelopatiche (ossia che impediscano lo sviluppo delle erbe infestanti), miscugli differenziati di specie agrarie, rotazioni colturali e specie geneticamente resistenti. Oltre a ciò si dovrebbe approfondire la ricerca sui vantaggi offerti da colture capaci di coprire e proteggere il terreno, sulle tecniche di lavorazione e sulle possibilità di integrare gli allevamenti nel sistema colturale.

Negli Stati Uniti gli agricoltori oggi usano soltanto una parte delle migliaia di specie agrarie esistenti. Potrebbero invece trarre rilevanti vantaggi dalla coltivazione di piante alternative, quali il triticale, l'amaranto, il ginseng e il lupino. E ancora, in aggiunta alla diversificazione, si dovrebbe raccogliere e conservare in permanenza il germoplasma (sementi, portainnesti e polline) delle tradizionali colture e delle corrispondenti specie selvatiche.

Banche di germoplasma ben gestite possono fornire agli specialisti impegnati nel miglioramento colturale una base genetica più ampia per produrre nuove forme coltivate con maggior resistenza ai parassiti, alle malattie e alla siccità. Gran parte del germoplasma che gli agronomi statunitensi usano oggi per il miglioramento colturale proviene dai paesi in via di sviluppo.

Anche le nuove varietà ottenute con le biotecnologie, come per esempio cereali capaci di fissare l'azoto di cui hanno bisogno, possono probabilmente essere incluse nei sistemi di coltivazione sostenibili. Ma né le biotecnologie né alcuna altra singola tecnologia potranno risolvere tutti i problemi posti da un metodo di agricoltura sostenibile ecologicamente equilibrato. Il successo di una simile forma di agricoltura non dipende affatto dalla creazione di supercolture: il sistema funziona con piante che sono già disponibili attualmente.

Una migliore istruzione professionale è altrettanto importante quanto un maggiore impegno di ricerca. Gli agricoltori hanno necessità di conoscere chiaramente che cosa significhi agricoltura sostenibile, e devono essere convinti della sua redditività. L'USDA e il Cooperative Extension Service dovrebbero fornire agli agricoltori informazioni aggiornate, accurate, pratiche e applicabili alle loro specifiche condizioni. Gli agricoltori e il resto della popolazione dovrebbero inoltre esser meglio informati circa le potenziali conseguenze ambientali negative e circa i rischi sanitari che derivano dall'inquinamento provocato da certe pratiche agrochimiche.

Uno dei metodi più efficaci per diffondere l'informazione sull'agricoltura sostenibile è quello costituito dalle reti di collegamento fra agricoltori, quale quella dei Practical Farmers dell'Iowa. Gli aderenti a quest'associazione hanno accettato di condurre ricerche e di realizzare prove dimostrative sulle tecniche sostenibili nelle loro aziende. Essi si incontrano regolarmente per scambiarsi informazioni e per confrontare i risultati. Poiché queste organizzazioni hanno suscitato crescente interesse e si sono rivelate efficienti, tutta la comunità dei proprietari terrieri dovrebbe tentare di promuoverne lo sviluppo.

Scienziati e ambientalisti hanno consigliato di imporre tasse su fertilizzanti e pesticidi per controbilanciare i costi ambientali dovuti all'uso di prodotti agrochimici, per finanziare la ricerca sull'agricoltura sostenibile e per spingere gli agricoltori a ridurre l'eccessivo impiego di prodotti agrochimici. Questo è proprio il sistema adottato dalla legislazione dello Stato dell'Iowa, con il quale nel 1987 si sono reperiti i finanziamenti per il Leopold Center for Sustainable Agriculture nell'ambito dell'Iowa Groundwater Protection Act.

L'agricoltura è un elemento fondamentale dello sfruttamento delle risorse naturali, un elemento su cui si fonda non solo la qualità della vita umana ma la sua stessa esistenza. Se gli sforzi per creare un'agricoltura sostenibile saranno coronati da successo, gli agricoltori ne trarranno vantaggi economici e tutta la società ne beneficerà in molti modi. Ma ciò che più importa è che, così facendo, un paese come gli Stati Uniti proteggerebbe le proprie risorse naturali e si avvicinerebbe a un vivere sociale più equilibrato e compatibile con l'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

POINCELOT RAYMOND P., *Toward a More Sustainable Agriculture*, AVI Publishing Co., 1986.

REGANOLD JOHN P., ELLIOTT LLOYD F. e UNGER YVONNE L., *Long-Term Effects of Organic and Conventional Farming on Soil Erosion* in «Nature», 330, n. 6146, 26 novembre 1987.

Alternative Agriculture, National Research Council, National Academy Press, 1989.

EDWARDS CLIVE A., LAL RATTAN, MADDEN PATRICK e altri (a cura), *Sustainable Agricultural Systems*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny (Iowa), 1990.

Per i lettori italiani segnaliamo:

CELLI GIORGIO, *L'ecologia del campo coltivato* in «Le Scienze quaderni» n. 53, aprile 1990.

Oliver Heaviside

Questo geniale e polemico fisico vittoriano, che disdegnava il rigore matematico, sviluppò la teoria del campo elettromagnetico e gettò le basi dei moderni circuiti elettrici che consentono la telefonia su lunghe distanze

di Paul J. Nahin

Nato in un povero quartiere di Londra, Oliver Heaviside non ebbe una formazione universitaria e fu disoccupato per tutta la vita, a eccezione di un periodo di sei anni trascorso come telegrafista. Eppure, in virtù delle sue grandi doti e della sua inflessibile forza di volontà, questo autodidatta divenne uno fra i principali fisici dell'epoca vittoriana. Egli chiarì ed estese la teoria dell'elettromagnetismo di James Clerk Maxwell, scoprì il principio circuitale che rese possibile la telefonia su lunghe distanze e previde la televisione, le comunicazioni radio transoceaniche e vari aspetti della teoria della relatività di Einstein.

Se pure fu tenuto in grande considerazione dagli scienziati del suo tempo, Heaviside è oggi quasi caduto nell'oblio, anche perché i suoi metodi ebbero così successo da essere considerati quasi ovvi: capita anzi che vengano menzionati come già esistenti in testi che descrivono l'opera di scienziati vissuti prima di lui. Oggi, per esempio, molti uomini di scienza credono che i vettori che descrivono le forze fossero già utilizzati da Newton, due secoli prima. In realtà fu Heaviside a introdurli nella fisica.

È strano che la sensibilità moderna, sempre alla ricerca di personaggi, abbia trascurato questo inglese, la cui individualità riesce a spiccare in un periodo pure costellato di personaggi straordinari, come il generale Charles Gordon, meglio noto come Gordon Pascià, Florence Nightingale, il reverendo Lewis Carroll e Jack lo Squartatore. Heaviside fu un eccentrico fra gli eccentrici, un uomo che si fece da sé in un secolo aperto all'iniziativa individuale.

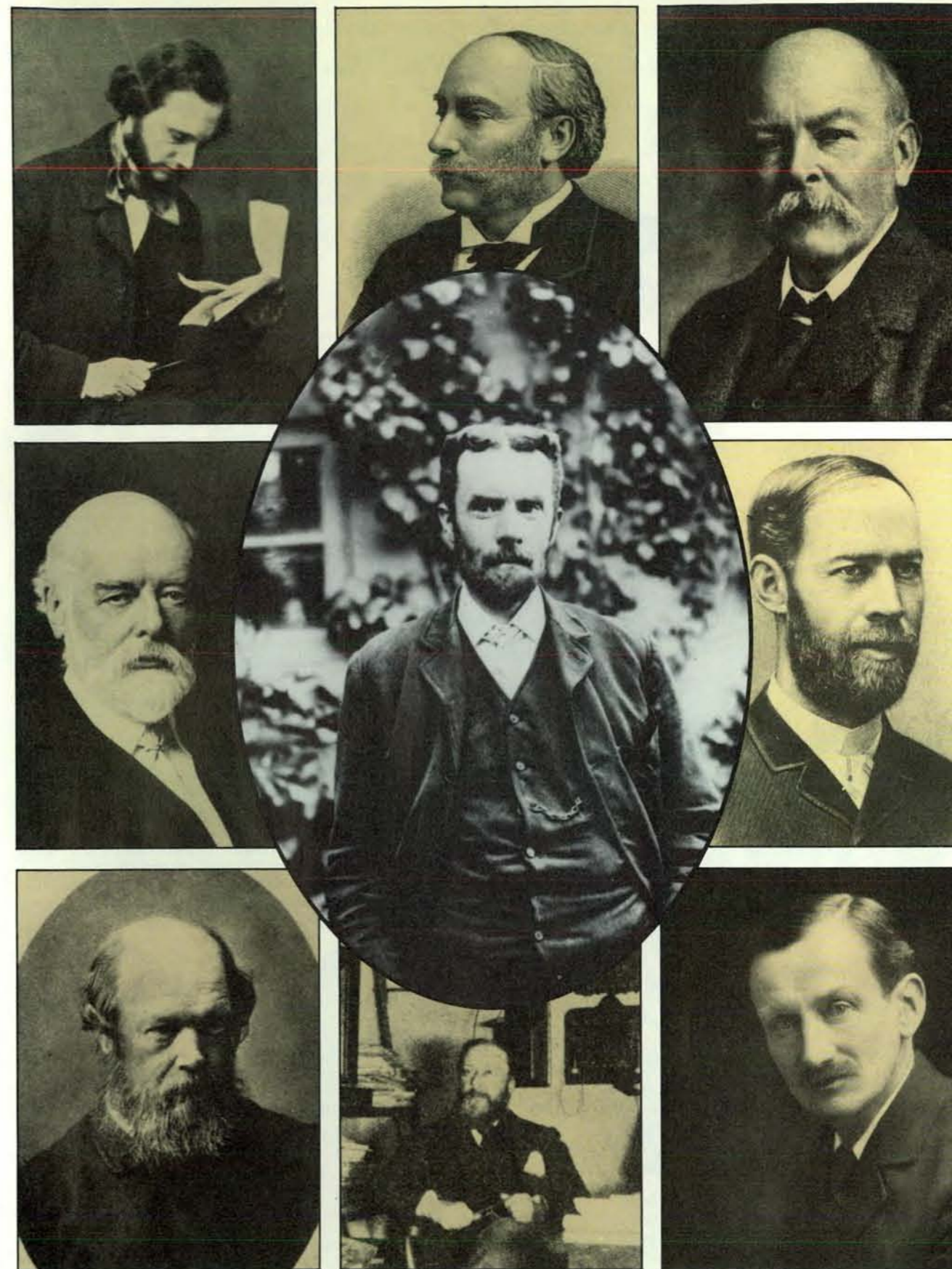
In breve, Heaviside è un personaggio che sembra tratto dalla pagine di un romanzo di Dickens. L'ultimo di quattro figli di un incisore di xilografie dalla salute malferma, a malapena in grado di provvedere alla famiglia, Heaviside nacque nel 1850, non lontano dalla fabbrica di lucido per scarpe in cui aveva lavorato Dickens da bambino. La scarlattina che lo colpì quando era ancora molto piccolo gli danneggiò permanentemente l'udito rendendogli difficili i rapporti con gli altri bambini. Questo stato di isolamento contribuì alla formazione di una personalità polemica e di un piglio sarcastico da cui si sarebbe in seguito lasciato trascinare a volte in misura eccessiva in attacchi sulla stampa a coloro con cui si trovava in disaccordo. Ricordava sempre con amarezza gli anni giovanili e affermava che quel periodo aveva «deformato permanentemente» il corso della sua vita.

Heaviside conseguì nondimeno risultati scolastici molto lusinghieri, classificandosi quinto fra più di 500 candidati a un esame del College of Preceptors nel 1865. Il voto peggiore conseguito dal futuro fisico matematico fu un deludente 15 per cento in geometria euclidea, una curiosa carenza che preannunciava la sua posteriore insofferenza per le dimostrazioni rigorose. «Euclide è il peggiore di tutti. - scrisse in seguito Heaviside - È scandaloso che i giovani debbano confondersi il cervello su mere sottigliezze logiche, sforzandosi di capire la dimostrazione di un fatto ovvio nei termini di qualcosa altrettanto... ovvio, e concepire in questo modo una profonda avversione per la matematica, quando potrebbero imparare davvero la geometria, un oggetto di studio di importanza fondamentale.»

In ogni caso il giovane Heaviside lasciò la scuola all'età di sedici anni, imparò da sé l'alfabeto Morse e i rudimenti dell'elettricità e a diciotto si recò in Danimarca a lavorare per una società dei telegrafi. Fu quello l'unico periodo in cui poté disporre di uno stipendio.

Heaviside ottenne quel lavoro attraverso i buoni uffici dello zio, Sir Charles Wheatstone, marito della sorella di sua madre. Wheatstone, un imprenditore di successo che contava fra i molti amici scienziati William Thomson (in seguito Lord Kelvin) e Michael Faraday, viene ricordato principalmente per il ponte di Wheatstone, un dispositivo per misurare la resistenza elettrica (nella cui invenzione non ebbe però alcun ruolo). Non dovette essere difficile per lui procurare quel lavoro al nipote, il quale su richiesta dello zio si era preparato aggiungendo il danese e il tedesco alle altre lingue che già conosceva. Heaviside, recandosi in Danimarca a lavorare per una società dei telegrafi, seguiva semplicemente l'esempio del fratello maggiore Arthur, già dipendente della Universal Private Telegraph Company, fino a quando, nel 1870, tutti i servizi telegrafici britannici finirono sotto il monopolio del British General Post Office (GPO).

Heaviside acquisì un'esperienza pratica come telegrafista e come tecnico localizzatore di guasti e ottenne varie promozioni. Ritornato in Inghilterra, nel 1871 divenne il principale operatore nell'ufficio della Great Northern Telegraph Company a Newcastle upon Tyne, che gestiva il traffico oltremare. Nel frattempo si era impegnato, sempre come autodidatta, in un ambizioso programma di studi scientifici e matematici. I suoi progressi sono attestati dai primi due suoi articoli sull'elettricità, pubblicati nel 1872 e nel 1873. Nel primo fece uso della sola algebra, mentre nel secondo si servì del calcolo infinitesimale per analizzare il ponte di Wheatstone, meritandosi così una menzione nella seconda edizione del *Treatise on Electricity and Magnetism* di Maxwell.

Pare sia stata proprio la lettura di questo magnifico trattato a indurre Heaviside ad abbandonare il posto di lavoro nel 1874 per dedicarsi completamente allo studio. (Secondo altri biografi fu invece la progressiva sordità a costringerlo a rinunciare al lavoro.) Fu una decisione di fondamentale importanza per un uomo di 24 anni che non disponeva di mezzi propri. Con grande sgomento della famiglia, con cui (e alle cui spalle) viveva, non tornò più sulla decisione. La fami-

Amici e nemici di Heaviside, rispettivamente conquistati dalle sue capacità e incattiviti dal suo sarcasmo, lo circondano in questo fotomontaggio. Gli amici sono (*in senso orario a partire da sinistra al centro*) Sir Oliver J. Lodge, Lord Kelvin, Lord Rayleigh, John H. Poynting e Heinrich Hertz; i nemici (*in basso, da sinistra a destra*) Peter G. Tait, William H. Preece e William Burnside.

glia dovette adattarsi alla routine da lui scelta, lasciando i pasti fuori della porta della sua camera sempre ermeticamente chiusa. Qui egli lavorava tutta la notte e gran parte del giorno alla luce di fumosi lumi a petrolio, che rendevano la sua stanza «più calda dell'inferno», per usare le parole di un suo conoscente.

Heaviside, come il giovane Einstein 25 anni più tardi, fu conquistato alla fisica dalla semplicità che vide trasparire dalla complessa matematica di Maxwell. Questi aveva dimostrato l'unitarietà dell'elettricità e del magnetismo mettendo in forma matematica la concezione di Faraday che li descriveva come campi. Il sistema di equazioni risultante spiegava molti fenomeni noti e ne faceva prevedere di insospettati. Fatto più importante, Maxwell aveva previsto che un campo elettrico oscillante nello spazio avrebbe generato un campo magnetico oscillante alla stessa frequenza che, a sua volta, avrebbe indotto un campo elettrico e così via. Quest'onda «elettromagnetica» si sarebbe necessariamente propagata alla stessa velocità della luce, anch'essa una radiazione elettromagnetica.

L'esistenza di una radiazione superluminale fu prevista da Heaviside vari decenni prima di venire osservata, sotto forma di luminescenza azzurra, nell'acqua che circonda sorgenti di elettroni di alta energia come il reattore di ricerca Triga Mark II della Cornell University (*nella fotografia*). Questa cosiddetta radiazione Čerenkov si produce quando una particella carica supera la velocità della luce in un mezzo denso, creando un'onda d'urto elettromagnetica a forma di cono (*disegno in alto*). L'equazione descrive ϕ, il semiangolo del cono, in termini di c, la velocità della luce nel vuoto, di n, l'indice di rifrazione del mezzo, e di v, la velocità della particella. Quando v si approssima a c, l'angolo del cono è massimo (circa 41 gradi in acqua). Via via che la particella rallenta, il cono va scomparendo.

Maxwell morì all'età di 48 anni nel 1879, nove anni prima che il genio tedesco Heinrich Hertz verificasse la sua previsione captando onde elettromagnetiche nello spazio. Poco dopo Oliver J. Lodge (in seguito Sir Oliver) - che sarebbe stato fra i più tenaci sostenitori di Heaviside - rivelò la presenza di onde elettromagnetiche in un conduttore metallico. Solo allora la teoria di Maxwell fu accettata quasi universalmente.

Heaviside non aveva atteso tale conferma perché considerava la teoria elettromagnetica «inconfutabilmente vera» sulla base della dimostrazione matematica di Maxwell, che giudicava degna di un «genio divino». Così si espresse nel 1918, spiegando quale fosse stata la sua prima impressione alla lettura dell'opera di Maxwell: «Vidi che era qualcosa di grande, di più grande, di grandissimo, con possibilità prodigiose in suo potere. Ero deciso a padroneggiare il libro e mi misi al lavoro... Mi occorsero vari anni prima di poter capire tutto ciò che era nelle mie possibilità. Allora misi Maxwell da parte e seguii la mia strada. E progredii molto più rapidamente.»

Heaviside semplificò enormemente le venti equazioni di Maxwell in venti variabili esprimendone l'essenza in due equazioni scritte in due variabili (le variabili descrivevano i vettori del campo magnetico e del campo elettrico). Gran parte del lavoro teorico fu svolto in parallelo con Hertz, il quale osservò generosamente nel suo libro sulle onde elettriche che «la priorità spetta al signor Heaviside». George Francis Fitzgerald, del Trinity College a Dublino, ebbe a scrivere: «Il trattato di Maxwell è ingombro dei detriti delle sue brillanti linee di assalto, dei suoi campi trincerati, delle sue battaglie. Oliver Heaviside ha sgombrato il campo, ha aperto una via di accesso diretta, ha costruito una strada ampia e ha esplorato una parte considerevole della regione».

Questo fu il bell'elogio fatto a Heaviside dall'uomo che in seguito divenne famoso come coscopritore della contrazione di Lorentz-Fitzgerald nella teoria della relatività. Per qualche anno le equazioni riformulate furono chiamate equazioni di Hertz-Heaviside, ma, in seguito, ci si dimenticò del contributo di Heaviside: il giovane Einstein si riferì a esse chiamandole equazioni di Maxwell-Hertz e oggi sono menzionate con il solo nome di Maxwell.

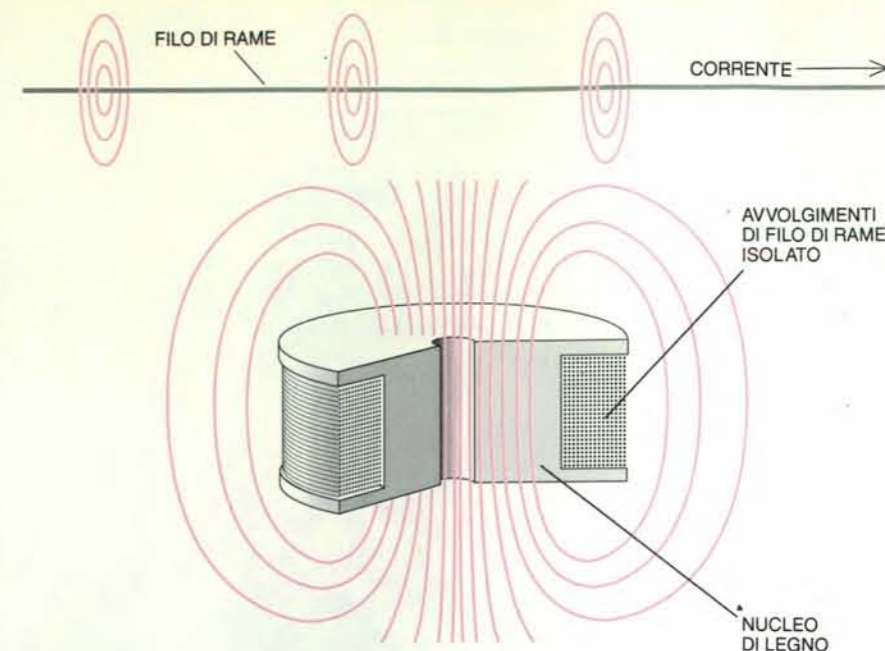
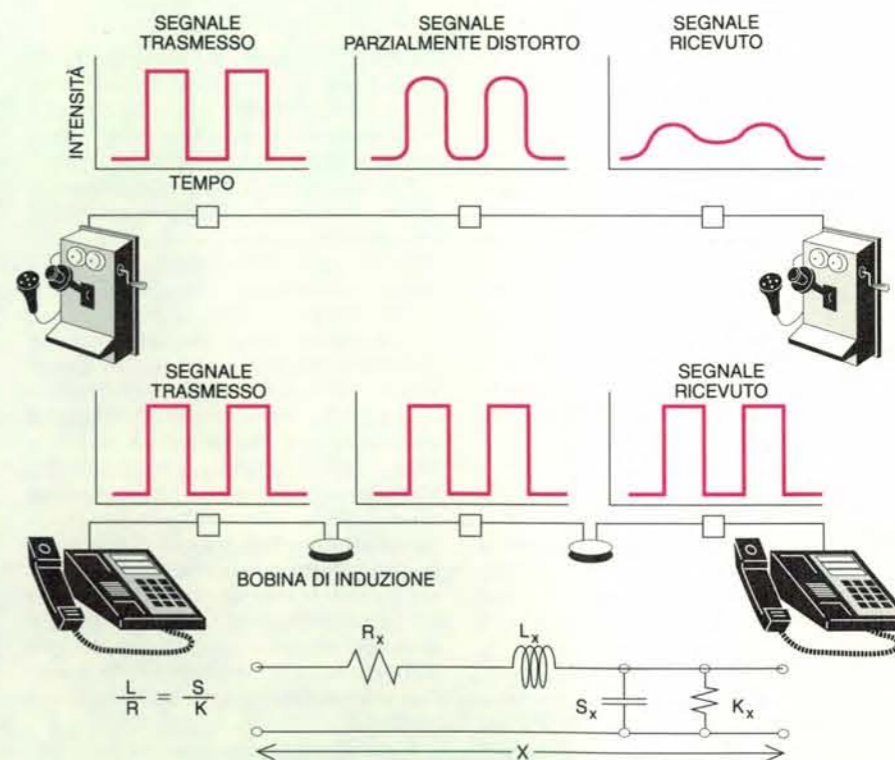
I metodi di Heaviside furono altrettanto importanti quanto i suoi risultati. Assieme a Josiah Willard Gibbs della Yale University, Heaviside insegnò l'impiego dei vettori ai fisici di tutto il mondo. I vettori descrivono le forze come grandezze direzionali: un vettore può rappresentare una forza in un determinato punto e un sistema di vettori può descrivere un campo di forze. I vettori possono essere sottoposti alle operazioni dell'aritmetica o del calcolo infinitesimale: la derivazione di un sistema di vettori che descrive un campo magnetico, per esempio, fornisce il vettore per il flusso elettrico in un dato punto.

Le operazioni vettoriali possono essere però molto complesse. Per esempio, non godono della proprietà commutativa: il prodotto vettoriale **a** per **b** non è uguale a **b** per **a**. Ma i vettori non sono neppure lontanamente complicati come i quaternioni, da cui derivano.

I quaternioni - che aggiungono una variabile scalare alle tre coordinate direzionali - erano stati introdotti in precedenza nel corso del secolo dal matematico irlandese William Rowan Hamilton. Il loro uso, in contrapposizione a quello dei vettori, fu sostenuto dal fisico scozzese Peter Guthrie Tait, un amico di Maxwell e di Kelvin. Né Maxwell né Kelvin si curarono molto dei quaternioni, ma entrambi si accontentarono di esprimere le loro obiezioni e di passare poi ad altri argomenti. Tait lottò invece aspramente a favore della «vecchia matematica», polemizzando con Heaviside e con Gibbs in numerose lettere al direttore di «Nature».

La matematica di Heaviside (nota oggi come calcolo operazionale) non fu approvata neppure dal consulente matematico dei «Proceedings of the Royal Society», William Burnside, il quale rifiutò il trattato di Heaviside per la sua mancanza di rigore. Heaviside ammise il difetto ma, avendo sempre disprezzato i «cavilli logici», scrisse: «E allora? Dovrei forse rifiutarmi di mangiare perché non capisco a fondo il processo della digestione?». Per un'ironica circostanza, colui che dovette comunicare a Heaviside il rifiuto, Lord Rayleigh, Cavendish professor all'Università di Cambridge, era proprio uno dei più grandi ammiratori delle sue innovazioni matematiche.

I vettori ebbero infine un successo tale da mettere completamente in ombra i loro stessi creatori. I libri di testo riesposero la teoria di Maxwell in termini di vettori, cosicché anche le ricerche anteriori di Maxwell finiscono con l'apparire più facili di quanto in realtà non siano state. Questa riformulazione astorica, così frequente nella didattica della scienza, ha privato in tal modo due generazioni di scienziati del giusto riconoscimento che, per uno studioso, è in fin dei conti l'unica vera remunerazione.

La successiva importante applicazione della teoria di Maxwell venne nel 1884, quando Heaviside e John Henry Poyn-

Nell'Ottocento gli ingegneri evitavano l'induzione nei circuiti su lunghe distanze a causa del suo effetto rallentante sulle trasmissioni. I ritardi sono spiegati dal fatto che il campo magnetico indotto da una corrente (*in alto*) accumula per breve tempo e poi scarica l'energia del segnale. Heaviside dimostrò però che l'aggiunta di induttanza a un circuito poteva permettergli di trasmettere senza distorsione, un risultato desiderabile che compensa lo svantaggio della lentezza. George A. Campbell, dell'American Bell Company, progettò le prime bobine di carico (*in basso*), in cui il campo indotto da ogni spira di conduttore rafforza quello della spira vicina, così che la bobina fornisce proporzionalmente più induttanza che resistenza. Le 300 bobine sperimentali di Campbell aggiunsero ciascuna 0,11 henry e 12 ohm a intervalli regolari lungo 55 chilometri di cavo telefonico.

La distorsione annulla un segnale perché le componenti di alta frequenza sono più veloci di quelle di bassa frequenza e quindi un impulso nitido in partenza diventa via via confuso (*in alto*). La trasmissione senza distorsione (*al centro*) incorpora il carico induttivo nell'equazione (*in basso, con lo schema del circuito*) che mette in relazione l'induttanza L, la resistenza lineare R, la capacità S e la resistenza dovuta alla dispersione del circuito K.

James Clerk Maxwell (1831-1879) descrisse matematicamente la teoria dell'elettromagnetismo in un difficile trattato che a Heaviside parve l'opera di un «genio divino». Heaviside abbandonò il lavoro a 24 anni per dedicarsi a elaborare ed estendere la teoria di Maxwell.

ting descrisse il cammino che l'energia elettromagnetica segue nello spazio. I due lavorarono con grandissimo impegno in una competizione tanto accanita quanto equilibrata, anche se fu Poynting il primo a pubblicare le sue ricerche, giustificando così il nome moderno di «vettori di Poynting». (Il nome risulta ancora più appropriato in lingua inglese perché i vettori «puntano» nella direzione del flusso di energia in ogni punto dello spazio.)

Anche in altri modi Heaviside spinse la teoria di Maxwell più avanti di quanto il maestro stesso avesse sperato. Heaviside fu affascinato, per esempio, da ciò che accade alle particelle cariche quando si muovono più velocemente della luce, e i suoi taccuini sono pieni di calcoli su come dovrebbero comportarsi tali particelle «superluminali». Un esempio di condizioni superluminali, che si verifica in mezzi densi come l'acqua, è la tenue luce azzurra che emerge dai reattori nucleari a piscina. Questo fenomeno si verifica perché gli elettroni che escono dal reattore superano in velocità la luce (*si veda l'illustrazione a pagina 76*), producendo un'onda d'urto elettromagnetica, qualcosa di simile al bang sonico prodotto da un aereo quando supera la velocità del suono. L'onda d'urto, visibile sotto forma di luce, è oggi chiamata radiazione Čerenkov, dal nome del fisico russo Pavel A. Čerenkov, che nel 1958 vinse il premio Nobel per le sue ricerche sul fenomeno, 50 anni dopo che questo era stato previsto da Heaviside.

Curiosamente, benché la teoria attuale vieti a una particella di propagarsi alla velocità della luce nel vuoto, il fatto che una particella possa superare tale velocità non viola alcuna legge. Alcuni teorici speculano su particelle per le quali la velocità della luce nel vuoto rappresenti un limite *minimo*. L'energia di questi «tachioni», sempre che essi esistano, si approssima a zero a velocità infinite e all'infinito alla velocità della luce. La teoria della relatività vorrebbe che essi viaggiassero a ritroso nel tempo, ponendo gli «effetti» prima delle «cause» e violando in tal modo la nozione di causalità, la quale d'altronde non è una legge fisica. Heaviside non sapeva nulla di questi effetti anticronologici, ma se i tachioni carichi esistessero effettivamente potrebbero essere rivelati attraverso la «radiazione di Heaviside» che dovrebbero emettere.

La brillante esposizione ed estensione della teoria di Maxwell da parte di Heaviside non passò inosservata poiché, anche se egli pubblicò la maggior parte dei suoi articoli in un periodico professionale per ingegneri elettrotecnici, l'«Electrician», questo veniva letto anche da molti eminenti accademici. Persino il grande Maxwell una volta vi pubblicò una nota. L'élite scientifica, perciò, era del tutto consapevole della statura di Heaviside.

Nel suo discorso inaugurale del 1889 come primo presidente dell'Institution of Electrical Engineers, Thomson (poi Sir William) definì decisamente Heaviside un'«autorità». In seguito, nel corso di quello stesso anno, Heaviside fu presentato ai lettori di «Nature» da Joseph Lodge come uno scienziato «le cui profonde ricerche nel campo delle onde elettromagnetiche si sono spinte più lontano di quanto chiunque possa ancora comprendere».

Due anni dopo, Heaviside fu nominato membro della Royal Society e la sua candidatura fu sostenuta da scienziati come Thomson, Lodge, Fitzgerald e Poynting. L'onore di essere membro della Royal Society era nel 1891, prima della proliferazione dei premi scientifici, ancora più grande di quanto non sia oggi. In soli 17 anni, quindi, Heaviside era salito dall'oscura condizione di telegrafista disoccupato a quella di scienziato di fama mondiale.

Tutto questo può far pensare al copione di un film di Hollywood. In realtà Heaviside accettò la nomina senza eccessivo entusiasmo: ai sentimenti di soddisfazione per il grande riconoscimento si accompagnava infatti la preoccupazione di poter essere criticato senza tanti riguardi da quelle stesse persone che ora lo applaudivano. Questo atteggiamento difensivo può essere compreso se si pensa agli eventi del decennio precedente, quando Heaviside si era trovato impegnato in molte aspre controversie dall'esito spesso incerto.

Il benevolo discorso di Thomson all'Institution aveva avuto uno speciale significato per un pubblico che aveva seguito la controversia fra Heaviside e il più temibile dei suoi molti nemici, William H. Preece, direttore tecnico del GPO. Proclamandosi «uomo pratico», con scarso rispetto per i teorici che rivestivano il loro lavoro di formule matematiche, Preece aveva idee ben precise su come costruire un circuito per telecomunicazioni. Heaviside pubblicò idee altrettanto precise in totale disaccordo con quelle di Preece e i due si scambiarono sulla stampa battute sempre più feroci. Quanto più si inaspriva la controversia, tanto più cresceva la posta in gioco.

Potrebbe stupire che ancora nel penultimo decennio dell'Ottocento fosse possibile un'infuocata polemica su principi fondamentali dell'elettricità. Le telecomunicazioni avevano raggiunto capacità che rimangono impressionanti ancor oggi e che, a quel tempo, avevano quasi il sapore della stregoneria. Si trasmettevano messaggi da una città all'altra e da un continente all'altro lungo grandi cavi alimentati da meccanismi giganteschi. Di fatto la maggior parte dei grandi progressi nelle macchine e nella tecnologia erano stati compiuti quasi senza alcun supporto teorico. L'unico fondamento matematico disponibile era un'analisi di un flusso elettrico di frequenza molto bassa in cavi lunghissimi, analisi che era stata eseguita una trentina di anni prima da Thomson. Quella teoria funzionava bene per la trasmissione di poche parole al minuto, ma era completamente inadeguata ai ritmi immensamente più veloci richiesti dalla telefonia.

Il problema che richiedeva soluzione urgente era quello di come far sì che un segnale ad alta frequenza non subisse distorsione attraverso un circuito. Una qualche distorsione è comunque inevitabile, come quella causata dalla resistenza elettrica, che estrae energia da un segnale convertendola in calore (inutilizzabile). Un'altra distorsione può essere causata dall'induttanza e dalla capacità, che accumulano per breve tempo l'energia di un segnale, rispettivamente, nel campo magnetico e nel campo elettrico. La scintilla che si produce quando si estrae la spina del tostapane dalla presa è un effetto dell'accumulo induttivo: è energia liberata da un campo magnetico indotto da una corrente elettrica che di colpo viene meno. Un condensatore, d'altra parte, accumula energia in un campo elettrico che può persistere anche quando viene tolto il collegamento con il circuito che lo carica. I condensatori ad alta tensione sono ciò che rende così pericoloso mettere le mani in un apparecchio televisivo anche quando non è collegato alla presa.

Gli effetti capacitivi spiegavano la maggior parte degli effetti di accumulo di energia nei cavi transoceanici della metà dell'Ottocento, come Thomson sapeva. Egli era però consapevole che, con i bassi flussi di segnale allora in uso, si poteva ignorare tranquillamente l'effetto induttivo del magnetismo e la dissipazione di energia dovuta alla resistenza.

Per quanto incompleta, la teoria di Thomson acquistò gradualmente lo status di dogma fra coloro che non si rendevano conto delle sue semplificazioni teoriche. Ma quelle semplificazioni, pur così ragionevoli agli inizi della telegrafia, divennero indifendibili quando furono applicate ai circuiti più veloci sviluppati per la telegrafia multiplex (in cui un singolo cavo trasmette simultaneamente vari messaggi) e per la telefonia. Questi circuiti divennero soggetti agli effetti di disturbo dell'induzione magnetica.

Il primo di tali effetti era un ritardo nella trasmissione conseguente al momentaneo accumulo di energia di segnale nel campo magnetico del circuito. Il tempo impiegato dall'energia a entrare nel campo e a uscirne limita la velocità massima del circuito. Inoltre l'energia perduta nel processo attenua il segnale: è questo l'unico motivo per cui Preece e altri suoi contemporanei manifestarono tanta avversione contro l'induzione, quando accadde loro di riflettere su di essa.

Il secondo effetto dell'induzione era ancora più fastidioso perché incideva in modo diverso sui componenti del segnale. Un segnale è semplicemente un'onda complessa scomponibile in uno spettro di onde sinusoidali semplici, ognuna delle quali ha una sua particolare frequenza e ampiezza (si veda l'articolo *La trasformata di Fourier* di Ronald N. Bracewell in «Le Scienze» n. 252, agosto 1989). Le frequenze più elevate percorrono il cavo di trasmissione più rapidamente delle frequenze inferiori e perdono in questo processo una parte maggiore della loro energia. Esse raggiungono perciò la loro destinazione in un tempo più breve, ammesso che riescano a raggiungerla.

Benché questo inconveniente possa essere superato nella telegrafia più semplice escludendo con filtri le frequenze più elevate, non è possibile fare la stessa cosa nelle trasmissioni telefoniche. Il codice Morse più veloce che una mano umana possa trasmettere non ha componenti essenziali superiori a 100 hertz (cicli al secondo), mentre il normale linguaggio parlato utilizza frequenze nell'ambito di migliaia di hertz. Nei primi telefoni realizzati da Alexander Graham Bell, la mescolanza di onde restava intelligibile solo per qualche decina di chi-

ELECTROMAGNETIC INDUCTION AND ITS PROPAGATION.—XL.

BY OLIVER HEAVISIDE.

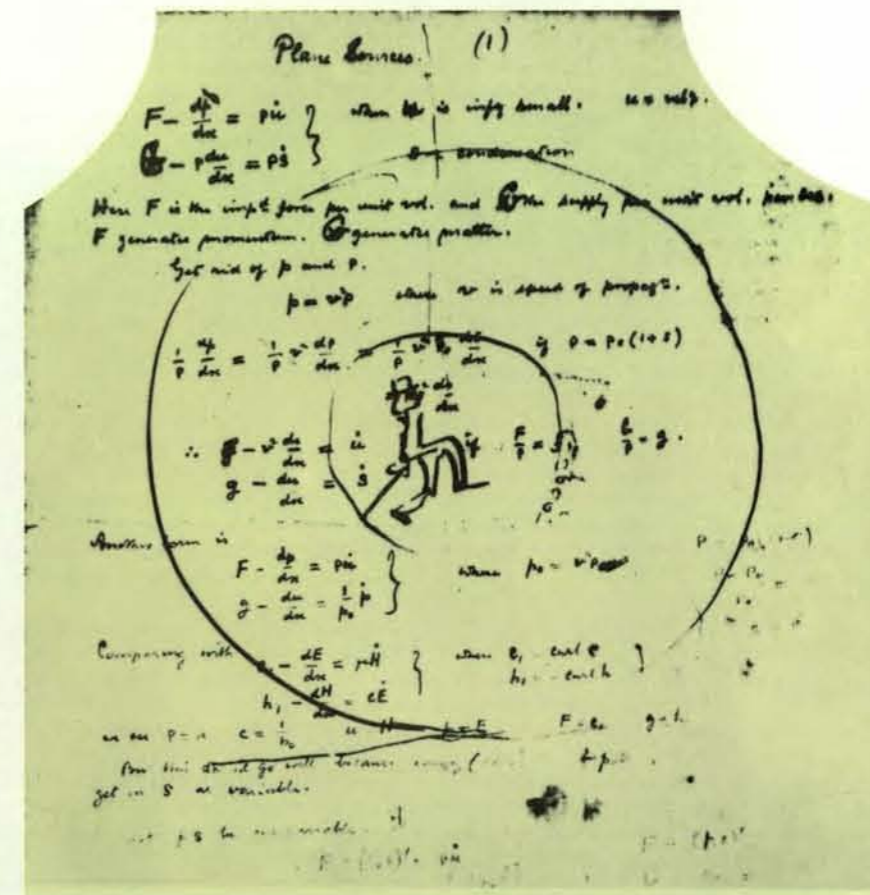
(Continued from page 51.)

Preliminary to Investigations concerning Long-distance Telephony and Connected Matters.

Although there is more to be said on the subject of induction balances, I put the matter on the shelf now, on account of the pressure of a load of matter that has come back to me under rather curious circumstances. In the present article I shall take a brief survey of the question of long-distance telephony and its prospects, and of signalling in general. In a sense, it is an account of some of the investigations to follow.

Sir W. Thomson's theory of the submarine cable is a splendid thing. His paper on the subject marks a distinct step in the development of electrical theory. Mr. Preece is much to be congratulated upon having assisted at the experiments upon which (so he tells us) Sir W. Thomson based his theory; he should therefore have an unusually complete knowledge of it. But the theory of the eminent scientist does not resemble that of the eminent scienticulist, save remotely.

But all telegraph circuits are not submarine cables, for one thing; and, even if they were, they would behave very differently according to the way they were worked, and especially as regards the rapidity with which electrical waves were sent into them. It is, I believe, a generally admitted fact that the laws of Nature are immutable, and everywhere the same. A consequence of this fact, if it be granted, is that all circuits whatsoever always behave in exactly the same manner. This conclusion, which is perfectly correct when suitably interpreted, appears to contradict a former statement; but further examination will show that they may be reconciled. The mistake made by Mr. Preece was in arguing from the particular to the general. If we wish to be accurate, we must go the other way to work, and branch out from the general to the particular. It is true, to answer a possible objection, that the want of omniscience prevents the literal carrying out of this process; we shall never know the most general theory of anything in Nature; but we may at least take the general theory so far as it is known, and work with that, finding out in special cases whether a more

È qui fotografata la prima pagina dell'articolo in cui Heaviside espose la sua teoria sul carico induttivo nel numero del 3 giugno 1887 del periodico inglese «Electrician».

Anche Heaviside conosceva qualche momento di evasione, come rivela questo schizzo trovato su uno dei suoi fogli di appunti densi di formule matematiche. Heaviside lasciò vari disegni che mostrano come egli avesse ereditato qualche inclinazione artistica del padre.

lometri, dopo di che il segnale diventava indecifrabile. Un impulso inizialmente chiaro, come quello il cui grafico di intensità nel corso del tempo corrisponde alla lettera M, finirebbe ben presto col trasformarsi in un intrico confuso paragonabile all'impronta di uno pneumatico consumato (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 77*).

L'atmosfera disperde pochissimo le onde radio (eccezione fatta per la ionosfera, di cui Heaviside fu fra i primi a postulare l'esistenza), il filo metallico le disperde in misura significativa e l'acqua le disperde al massimo grado. Questa differenza nella dispersione spiega perché sia stata la radio a trasportare la parola umana al di là dell'oceano molto tempo prima che abbiano potuto farlo i cavi telefonici. Essa spiega anche perché fino a oggi la Marina statunitense non sia stata in grado di impartire comandi ai suoi sommergibili in immersione e perché, per rimediare a questa situazione, abbia proposto di costruire un sistema di trasmissioni radiofoniche a frequenza estremamente bassa, con un'antenna sotterranea estesa per centinaia di chilometri quadrati.

Preece non comprendeva questi fenomeni; egli affermò semplicemente che l'induzione magnetica era una brutta cosa che poteva e doveva esser eliminata mediante una progettazione appropriata dei circuiti, come se si potesse abolire una proprietà intrinseca dell'elettricità. Peggio ancora, non comprese perché Heaviside si ostinasse a voler estendere il raggio d'azione del telefono. «Io ne ho uno nel mio ufficio - dichiarò una volta Preece - ma soprattutto per mostra, non avendo alcun bisogno di usarlo. Se voglio mandare un messaggio in un'altra stanza, uso un campanello o mando un ragazzo.»

Preece giunse alla sua formulazione per costruire circuiti senza distorsione estendendo la «legge dei quadrati» di Thomson, la quale dice che un segnale introdotto a un'estremità di un circuito raggiunge l'intensità massima all'altra estremità, dopo un ritardo proporzionale al quadrato della lunghezza del cavo. Questa legge si applica però solo a cavi così lunghi da avere un accumulo elettrico trascurabile, un fatto che Preece ignorava.

Si può dire che un articolo pubblicato da Preece nel 1887, in cui egli presentava un'equazione per calcolare la massima lunghezza per un circuito telefonico in grado di trasmettere il suono in modo nitido, abbia impedito il progresso delle telecomunicazioni britanniche per una ventina d'anni. La sua equazione metteva in relazione resistenza e capacità totale e unitaria, lunghezza totale e una serie di parametri arbitrari per i materiali dei circuiti e per i loro schemi costruttivi. Benché Preece avesse continuato a lavorare per parecchi anni sopra i suoi parametri, non fu mai in grado di spiegare con essi quanto avveniva in pratica: un circuito telefonico che, secondo le sue equazioni, non avrebbe mai potuto esistere collegò molto bene Boston a Chicago.

Tre mesi dopo Heaviside attaccò la teoria di Preece sulla rivista «Electrician», specificando per la prima volta le condizioni richieste per la trasmissione di un segnale non distorto: il rapporto tra l'induttanza e la resistenza *lungo* il circuito deve essere uguale al rapporto tra la capacità e la resistenza di dispersione *attraverso* il circuito (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 77*). Tipicamente, Heaviside infiorò la sua trattazione matematica con beffardi riferimenti a Preece che definiva uno «scienziatucolo». Ma ciò che doveva aver fatto infuriare Preece più di tutto fu il suggerimento di Heaviside secondo cui, per progettare un circuito senza distorsioni, si deve aumentare l'induzione e non minimizzarla.

Heaviside immaginò un conduttore avvolto in spire molto fitte, un solenoide, il cui elettromagnetismo concentrato avrebbe molto accresciuto l'induttanza del circuito senza farne aumentare sensibilmente la resistenza. Heaviside suggerì al fratello Arthur di consigliare al GPO la realizzazione di una tale «bobina di carico», ma lasciò cadere l'idea dopo avere appreso che Preece aveva diritto di veto su tutte le proposte di ricerca che venivano fatte al GPO. In questo caso, infatti, Preece avrebbe senza dubbio fatto valere il suo diritto. Un brevetto per una simile bobina fu ottenuto una decina di anni dopo da Michael I. Pupin, professore alla Columbia University. George A. Campbell, un dipendente dell'American Bell Company, progettò a cavallo del secolo la prima bobina in grado di avere applicazioni pratiche. Heaviside non ricevette né una remunerazione né un riconoscimento per il lavoro svolto in questo settore.

Tra l'altro, Heaviside aveva un bisogno particolarmente pressante di denaro, dato che gli era morto il padre e i diritti della sua grande opera, *Electromagnetic Theory*, si erano rivelati deludenti. Egli fu salvato da questa difficile situazione da una pensione statale concessagli nel 1896, su richiesta di Fitzgerald e di altri eminenti scienziati suoi sostenitori.

Heaviside affrontò la sua successiva controversia pubblica senza alcun astio, forse perché l'avversario era in questo caso l'amico Thomson, ora Lord Kelvin. Qui il problema era quello dell'età della Terra, la quale veniva calcolata sulla base del tempo che essa avrebbe impiegato a irraggiare nello spazio una presunta dotazione iniziale di calore. Nessuno si rendeva conto allora che la sorgente attiva del calore della Terra era il decadimento di sostanze radioattive contenute al suo interno. L'assunto di Kelvin che il calore si fosse diffuso verso l'alto attraverso tutti gli strati geologici a una velocità uniforme lo condusse a fissare per la Terra un'età massima di 98 milioni di anni, un periodo assolutamente troppo breve perché la selezione naturale avesse potuto compiere il lavoro che le attribuiva Darwin. Heaviside suppose due velocità di diffusione, una per l'interno e una per la crosta, e su questa base stimò che la Terra avesse un'età di almeno 300 milioni di anni. Fu il canto del cigno di Heaviside: egli scomparve dalle rubriche delle lettere al direttore poco dopo l'inizio del secolo, essendosi trasferito, nel 1908, a Torquay, sulla costa meridionale della Gran Bretagna.

Qui la sua appartenenza alla Royal Society e altri onori non avevano alcun significato per i vicini di casa, che lo trattavano come una persona ridicola. L'accresciuto isolamento e gli effetti negativi dell'età accentuarono la sensazione di essere perseguitato che affliggeva Heaviside. Beverly Nichols, uno scrittore che crebbe nella casa accanto a quella di Heaviside, lo ricordava come un eremita strano e amareggiato, che firmava le sue lettere col titolo bizzarro che si era autoattribuito di W.O.R.M. Le lettere non erano le iniziali di nulla, ma significavano solo «verme»: esattamente l'opinione che, secondo Heaviside, gli altri avevano di lui. Una volta Heaviside, narra ancora Nichols, sostituì i suoi mobili con blocchi di granito «che stavano nelle stanze spoglie come i mobili di un qualche gigante del Neolitico. Egli vagava in quelle stanze fantastiche, sempre più sporco e sempre più trasandato, con una sola eccezione: curava sempre molto le unghie, che dipingeva di un vivace color ciliegia».

La morte di Heaviside, avvenuta nel febbraio 1925, fu probabilmente la conseguenza indiretta di una caduta da una scala avvenuta vari mesi prima. Fu sepolto nella tomba dei suoi genitori e il suo nome è visibile ancor oggi sulla lastra tombale solo quando l'erba è stata appena tagliata. La prossima volta che vi capita di fare una telefonata su una lunga distanza e la voce dall'altro capo del filo vi arriva forte e chiara, pensate per un istante all'uomo geniale e fragile che l'ha resa possibile.

BIBLIOGRAFIA

LÜTZEN JESPER, *Heaviside's Operational Calculus and the Attempts to Rigorise It* in «Archive for History of Exact Sciences», 21, pp. 161-200, 1979.

HUNT BRUCE J., *"Practice vs. Theory": The British Electrical Debate, 1888-1891* in «Isis», 74, n. 273, settembre 1983.

BUCHWALD JED Z., *From Maxwell to Microphysics*, University of Chicago Press, 1985.

NAHIN PAUL J., *Oliver Heaviside: Sage in Solitude*, IEEE Press, 1988.

L'ANGOLO MATEMATICO

di Ian Stewart

Quante capre nel frutteto? Pick, picchetti, capre e mele

Accidenti, accidenti e poi accidenti... Quinn, il fattore, non scherzava proprio.

«Barney, hai fatto di nuovo entrare le capre nel frutteto!»

«Sì, Al. Era tempo che andassero a pascolare.»

Quinn sospirò.

«Non prima che siano state raccolte le mele, Barney! Sono un po' in ritardo quest'anno, a causa della siccità.»

L'estate era stata secca nel Weffolk.

«Lo sai che cosa combinano, Barney! Colpiscono i rami con le corna, fanno cascare le mele e poi si rimpinzano. Cacciale subito.»

Quinn sbatté a terra il cappello e lo calpestò rabbiosamente, poi percorse il frutteto contando quanti alberi avessero perso le mele: 314, non uno di meno. Si appoggiò quindi alla porta e se ne stette lì a meditare masticando un filo di paglia. Alla fine prese una decisione.

«Bene, tanto vale approfittarne. Barney, fai un recinto intorno agli alberi che hanno perso le mele e mettici a pascolare le capre. E fai attenzione che non si avvicinino agli altri alberi!»

Barney si affrettò a obbedire e, quel pomeriggio, gli unici rumori che si sentirono furono quelli dei martelli che inchiodavano agli alberi un recinto di filo di ferro e i belati delle capre spaventate.

A metà pomeriggio, Barney riapparve, tutto sudato e pieno di fango.

«Finito, Al. Che fatica! Ho inchiodato il recinto a 199 alberi! Ora vado ad aprire alle capre.»

«Bene, ma bisogna prima vedere se l'erba basterà per tutte.»

«Eh»?

«È semplice, Barney. I meli sono piantati ai nodi di una griglia a maglie quadrate, vero?»

«Sì, Al.»

«Bene. Ora bisogna che ciascuna capra possa brucare ogni giorno la quantità d'erba che è contenuta in un quadrato della griglia; è la sua razione giornaliera. Ci sei? Un quadrato, una capra.»

«Hmm... Sì!»

«Allora non hai che da contare quanti quadrati sono racchiusi dal tuo recinto, e quello è il numero di capre che puoi metterci.»

«Ah, sì. Ma... Al?»

«Sì Barney?» disse Algernon Quinn con una punta di esasperazione nella voce.

«Il fatto è che non ci sono solo quadrati. Ho dovuto installare delle parti del recinto di traverso.»

«Allora trova l'area totale prendendo come unità l'area di un quadrato.»

«Troppo difficile, Al. Il recinto ha una forma strana» (*si veda l'illustrazione 1*).

Finalmente, Algernon si decise ad andare a vedere. Dopo una ricca serie di imprecazioni Al e Barney decisero di andare a chiedere consiglio a Jacob Staff, un agrimensore che abitava nella città vicina.

«Che problema interessante! - disse Jacob - Posso rilevare il frutteto e calcolarne la superficie per triangolazione...»

«Bene!»

«Sempre che accettiate di pagare le spese regolamentari...»

«Spese? Quali spese?»

«100 sterline per la mappa e altre 100 per la triangolazione.»

«200 sterline? Nonno Herbert si rivolterebbe nella tomba, se fosse morto!»

«Bene, c'è un modo più economico. È un vecchio trucco da agrimensore. Vedete, voi avete piantato il vostro frutteto secondo uno schema che in matematica si chiamerebbe reticolo.»

Barney fece la faccia scura.

Jacob si affrettò a spiegare: «Un reticolo è una griglia a maglie quadrate, Algernon.»

«Ah, perché non l'hai detto subito?»

«Credo di averlo detto, ma non importa. Poi, avete fissato il recinto di albero in albero, in modo da formare un poligono di reticolo (*si veda l'illustrazione 2*). Mi avete detto che ci sono 314 alberi all'interno o lungo il perimetro del poligono. Di questi, esattamente 199 sono sul perimetro, dato che Barney ha fissato il recinto su questo numero di alberi. Quindi 115 alberi si trovano all'interno del recinto.»

«D'accordo, ma mi chiedo a che cosa possa servire tutto questo.»

«Esiste una formula molto bella, il teorema di Pick, che venne scoperta nel 1899 e che permette di calcolare la superficie di un poligono i cui vertici si trovino su un reticolo (in breve, un poligono di reticolo). Tutto quello che serve sapere è il numero di punti del reticolo (gli alberi) all'interno e il numero di punti sul perimetro. È di uso semplicissimo e verrebbe a costarvi solo 5 sterline.»

«Oh, 5! Così andrebbe decisamente meglio.»

Ci fu un lungo silenzio.

«Andiamo, allora.»

«C'è solo un problema - disse Jacob - ho dimenticato la formula.»

«Un bell'esempio di inutilità per un agrimensore!»

«Non essere così categorico, Algernon! Sapere che una formula di questo genere esiste ci può essere d'aiuto.»

«E allora, sapere che c'è una superficie non ci serve a niente?»

«È una cosa ben diversa. Sapendo che la formula esiste, possiamo ricostruirla. Mentre una valutazione diretta dell'area ci riporta alla tecnica da 200 sterline.»

«Forza, allora, Jake. Ma ti avverto: noi di campagna con l'algebra e la geometria non ci sappiamo fare molto; ci intendiamo di più di capre o di pecore.»

«Per il nostro problema, Algernon, penso che l'algebra ci servirà più delle pecore.»

«Per esempio?»

«Ritroveremo la formula affrontando dei casi particolari. Chiamiamo A l'area del poligono, B il numero di punti sul perimetro e C il numero di punti interni. Esaminiamo dei casi semplici. Per esempio, per un quadrato 1×1, si ha: $A = 1$, $B = 4$ e $C = 0$. Allo stesso modo, per un rettangolo 1×2 si ha: $A = 2$, $B = 6$ e $C = 0$. Per un rettangolo 1×3, $A = 3$, $B = 8$ e $C = 0$. E così via (*si veda l'illustrazione 3*). Possiamo costruire una piccola tavola.»

«OK! Vado a prendere gli attrezzi.»

«No, una tavola come questa:

Dimensione	A	B	C
1×1	1	4	0
1×2	2	6	0
1×3	3	8	0
1×4	4	10	0

«Oh!»

«Allora, non notate niente a proposito di questi numeri?»

«Certo. Nella colonna C non c'è un bel nulla.»

«È vero che C è sempre uguale a zero, ma non è questo il tipo di relazione che ho in mente, e d'altronde questo vuoto mi disturba un po' perché dimostra che non ho scelto dei poligoni abbastanza generali. Ciononostante, vedo delinearsi una specie di legge. Il valore di B è prossimo a $2A$. In effetti, la formula è: $B = 2A + 2$ in ciascun caso. Per l'area, questo significa: $A = B/2 - 1$. L'area è la metà dei punti sul bordo, meno uno.»

«Bravo!»

«In effetti, possiamo fornire la dimostrazione per un rettangolo $1 \times l$ di lunghezza qualsiasi (*si veda l'illustrazione 4*). La sua superficie è l in quanto ciascun quadrato elementare del reticolo è di superficie unitaria. Ci sono $l + 1$ punti sul bordo superiore e $l + 1$ su quello inferiore, per un totale di $2l + 2$.»

«Due elle?!»

«Sì, Algernon: l. È un simbolo che indica un numero qualsiasi.»

«Oh!»

«Allora $A = l$, $B = 2l + 2$ e $C = 0$, la formula funziona!» concluse Jake tutto soddisfatto.

«Splendido!»

«Proviamo a fare la verifica su un quadrato 2×2 (*si veda l'illustrazione 5*). In questo caso, $A = 4$, $B = 8$ e $C = 1$; e $B/2 - 1 = 4 - 1 = 3$. Uffa! Non va!»

«Ah, ma qui il numero di punti interni non è più uguale a zero.»

«Buona osservazione. È proprio vero, Algernon! Hmm... Proviamo su alcuni rettangoli $2 \times l$ e confrontiamo A con $B/2 - 1$.

Dimensione	A	B	C	B/2-1	A - (B/2-1)
2×1	2	6	0	2	0
2×2	4	8	1	3	1
2×3	6	10	2	4	2
2×4	8	12	3	5	3
2×5	10	14	4	6	4
2×6	12	16	5	7	5

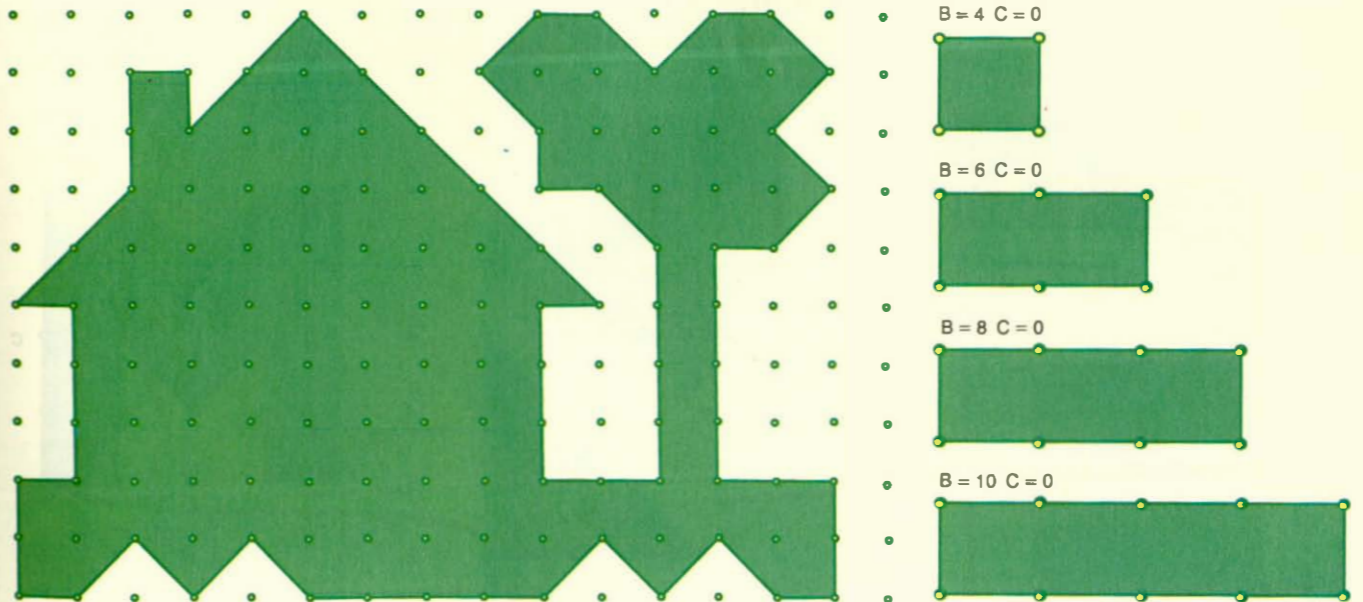
«Ah! Ora la vedo la formula!»

«Ora un idiota qualsiasi può vederla! È chiara come il vinello di casa mia!»

«Certo, Algernon. L'ultima colonna è uguale a quella di C, il che significa che $A - (B/2 - 1) = C$. Trasformiamo, e abbiamo il:

Teorema di Pick

L'area A di un qualsiasi poligono di reticolo è data, in funzione del numero di punti B situati sul perimetro e del numero di punti interni C, dalla formula: $A = B/2 + C - 1$.

1. ***Quante capre possono trovare nutrimento nella parte recintata del frutteto? (Ciascuna capra bruca la quantità di erba che si trova in un quadrato del reticolo.)***

2. ***Un poligono di reticolo ha i suoi vertici sui punti di un reticolo quadrato.***

3. ***Rettangoli*** $l \times l$ ***per*** $l = 1, 2, 3, 4$.

«Non è magnifico?»

«Certo, Jake. Magnifico come... 195 sterline.»

«Hmm... Ma il teorema rimane da dimostrare.»

«Eh? Non l'abbiamo appena fatto?»

«Curiosità e congetture, Algernon, niente di più. Naturalmente, dovremo provare con altri esempi. Così un quadrato 3 × 3 (*si veda l'illustrazione 6a*) ci dà $A = 9$, $B = 12$ e $C = 4$, da cui si ottiene:

$B/2 + C - 1 = 6 + 4 - 1 = 9$, che è uguale ad A. Ma la formula non deve valere solo per i rettangoli, che sono casi troppo semplici. Vediamo un triangolo (*si veda l'illustrazione 6b*), la metà di un quadrato 3 × 3. Allora A è uguale a 4,5, cioè la metà di 9, $B = 9$ e $C = 1$. Quindi, $B/2 + C - 1 = 4{,}5 + 1 - 1 = 4{,}5$, e la formula funziona ancora! Molto incoraggiante. Esaminiamo ora il poligono a forma di M (*si veda l'illustrazione 6c*) $B = 20$ e $C = 3$, da cui si ottiene:

$B/2 + C - 1 = 10 + 3 - 1 = 12$.»

Siete in grado di verificare se 12 è davvero il valore di A?

«Torniamo al mio frutteto. Il numero di alberi sulla recinzione è...»

«Calma, Algernon. Dobbiamo ancora dimostrare che il teorema è vero.»

«Ma abbiamo un sacco di prove!»

«Pensavamo anche di avere un sacco di prove che $A = B/2 - 1$, e invece era sbagliato. Allora come facciamo a sapere di non sbagliarci ancora? Dobbiamo elaborare una dimostrazione. Torniamo ai casi del tipo 1 × l. Supponiamo di aggiungere un quadrato a un'estremità (*si veda l'illustrazione 7a*). Allora:

A aumenta di 1,
B aumenta di 2,
C non cambia (zero).

E di conseguenza:

$B/2 + C - 1$ aumenta di 1.

E con ciò otteniamo proprio A. Nel caso 2 × l (*si veda l'illustrazione 7b*), aggiungiamo un blocco 2 × 1, in modo che:

A aumenta di 2,
B aumenta di 2,
C aumenta di 1 e
$B/2 + C - 1$ aumenta di 2, proprio come A. Mi viene un'idea: *se si uniscono due poligoni di reticolo, i valori dell'espressione $B/2 + C - 1$ si sommano.*» [I particolari del ragionamento si trovano nel riquadro nella pagina a fronte.]

«Allora sei a posto!»

«Certamente. Vedi, questo ci assicura che se il teorema di Pick vale per due poligoni di reticolo Q e R, vale anche per la loro unione P.»

«Perché?»

«Perché le loro superfici si sommano come i loro valori di Pick.»

«Esatto! Un punto per te, capo. Adesso capisco.»

«E per di più questo ci fornisce un'eccellente strategia per la dimostrazione. Possiamo dimostrare il teorema per qualsiasi poligono di reticolo nel caso sia scomponibile in unioni di poligoni elementari per i quali il teorema sia stato verificato. Allora, che tipo di poligoni elementari scegliamo?»

«Dei quadrati?»

«No, vogliamo riuscire a ottenere i poligoni più generali, con i lati obliqui.»

«Ah! Dei triangoli?»

«Proprio così. E per una buona ragione: ogni poligono - di reticolo o non di reticolo - può essere scomposto in triangoli» (*si veda l'illustrazione 9a*).

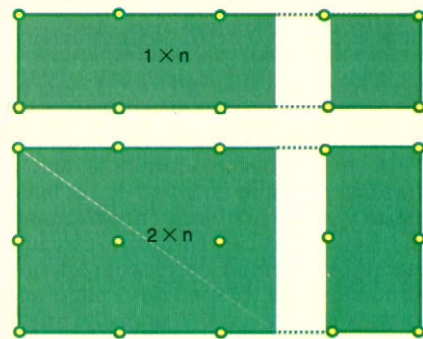
«Vedo.»

«Ora, si può ottenere qualsiasi triangolo unendo o togliendo triangoli rettangoli o rettangoli. Prendiamo, per esempio, il caso del triangolo U dell'illustrazione 9b; chiamiamo T il triangolo grande e U, V, W, X i vari poligoni. Allora:

Pick(T) = Pick(U) + Pick(V) + + Pick(W) + Pick(X),

e anche:

Area(T) = Area(U) + Area(V) + + Area(W) + Area(X).

Ora, se sappiamo che Pick dà l'area

7. ***Si aggiunge un blocco a un'estremità di un rettangolo.***

esatta per ogni triangolo rettangolo e per ogni rettangolo, quindi per T, V, W e X, allora queste due uguaglianze ci mostrano che la formula di Pick vale anche per il triangolo U.

Ci resta da osservare che i triangoli rettangoli sono metà di rettangoli (*si veda l'illustrazione 9c*). Anche in questo caso, i Pick e le Aree si comportano allo stesso modo: sono, per il triangolo, la metà di ciò che sono per il rettangolo: se il teorema di Pick è verificato per i rettangoli, lo è anche per i triangoli rettangoli, ma i rettangoli sono costruiti con quadrati unità (*si veda l'illustrazione 9d*). Alla fin fine si tratta di tornare a verificare il teorema di Pick per un quadrato unità... E questo lo abbiamo già fatto fin dalla nostra prima tabella.»

Se non siete convinti, fate altre prove (si veda l'illustrazione 10). Trovate le superfici senza applicare il teorema di Pick, poi utilizzandolo e verificandone la correttezza. E, a questo punto, sareste in grado di estendere il teorema di Pick a poliedri i cui vertici appartengano a un reticolo tridimensionale?

«Adesso, Algernon, puoi decidere il numero di capre da mettere a pascolare nel tuo frutteto.»

«Era ora! Dunque, abbiamo $B = 199$ e $C = 115$. L'area deve essere:

$A = B/2 + C - 1 = 99{,}5 + 115 - 1 = 213{,}5$.»

Si voltò verso il suo lavorante.

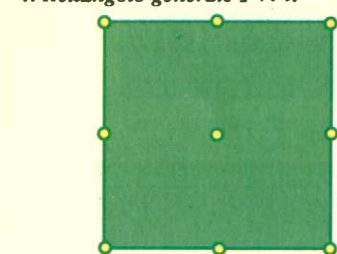
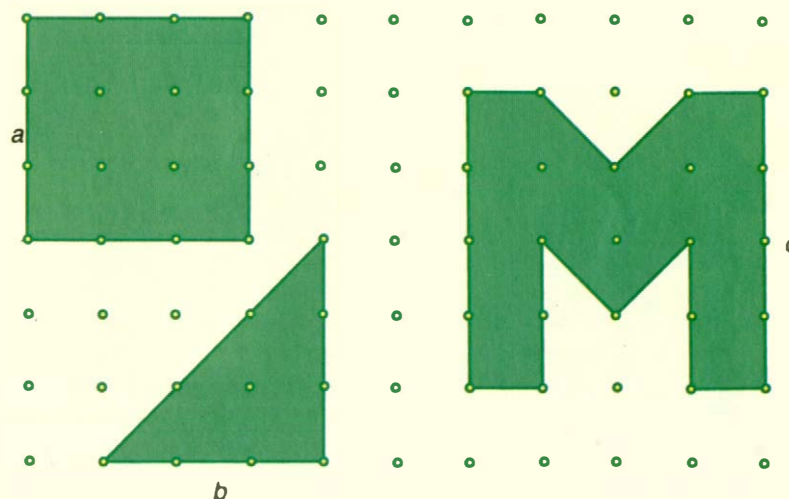
«Barney! Porta 213,5 capre a pascolare nel frutteto, e senza perdere neanche un minuto!»

«Algernon, dimmi un po' come faccio a portare anche la mezza capra nel frutteto?»

«Prendi il coltello grande nel...»

«Io suggerirei di usare un capretto, Algernon. Una capra tagliata in due di erba ne mangerebbe ben poca.»

N + 1 PUNTI

4. ***Rettangolo generale 1 × l.***

5. ***Quadrato 2 × 2.***

6. ***Alcuni poligoni di reticolo da studiare.***

Riquadro 1: 1/2B + C - 1 è additivo

Prendiamo in considerazione due poligoni di reticolo Q e R uniti come nell'illustrazione 8 e chiamiamo P la loro unione. Supponiamo che il loro bordo comune abbia K punti all'interno di P *(punti blu)*, più due alle estremità *(punti rossi)*. Per il poligono di reticolo P, definiamo:

$$\text{Pick}\,(P) = 1/2B_P + C_P - 1$$

dove B_P è il numero dei punti del bordo di P e C_P è il numero dei punti interni, e facciamo lo stesso per Pick (Q) e Pick (R). Affermo che l'espressione Pick è additiva, vale a dire che se P è l'unione di Q e R e questi non hanno parti di superficie in comune, allora Pick (P) = Pick (Q) + Pick (R). Vediamo sulla figura che:

$$B_P = B_Q + B_R - 2K - 2$$

perché i K punti blu sul bordo tra Q e R sono interni per P, il che vuol dire che bisogna sottrarre $2K$ punti del bordo, e i due punti rossi che sono sul bordo per P, Q e R sono dunque contati per quattro in $B_Q + B_R$ il che ci porta a sottrarre ancora 2. Allo stesso modo:

$$C_P = C_Q + C_R + K$$

perché i punti interni di P sono dati da quelli di Q e di R, più i K punti blu. Di conseguenza:

$$\text{Pick}\,(P) = 1/2\,(B_Q + B_R - 2K - 2) + (C_Q + C_R + K) - 1$$

che è uguale a:

$$1/2B_Q + C_Q - 1 + 1/2B_R + C_R - 1$$

vale a dire:

$$\text{Pick}\,(Q) + \text{Pick}\,(R).$$

8. ***Unione di due poligoni di reticolo con un lato in comune.***

9. Scomposizione di un poligono in triangoli e tappe della dimostrazione del teorema di Pick. I casi complessi sono ricondotti a casi più semplici. (a) Se il teorema è vero per triangoli di reticolo, allora è vero anche per ogni poligono di reticolo. (b) Se è vero per triangoli rettangoli, allora è vero anche per ogni triangolo. (c) Se è vero per i rettangoli, allora è vero anche per i triangoli rettangoli. (d) Se è vero per i quadrati 1 × 1, allora è vero anche per i rettangoli. (e) L'unico caso che bisogna verificare!

«Già, già. Hai ragione! Accidenti se sei furbo, Jake!»

Algernon scuoteva la testa con aria di ammirazione. Si chinò a togliersi qualcosa dalle scarpe e, sbattendo i piedi, si diresse verso un punto in cui otto lastre di cemento erano state disposte a quadrato (*si veda l'illustrazione 11*) per isolare almeno un angolo di cortile dal fango e farci asciugare le scarpe.

«Interessante. - disse - Ecco un altro poligono di reticolo. Rendiamo omaggio ancora una volta al vecchio Pick. Vediamo... Abbiamo $B = 16$ e $C = 0$, quindi l'area deve essere:
$B/2 + C - 1 = 8 + 0 - 1 = 7$. È falso, accidenti: il risultato dovrebbe essere 8! Jacob, ascolta un po', qui c'è un piccolo problema!»

Che cosa c'è che non va, e perché? Quale ipotesi è stata omessa nella nostra «dimostrazione» estremamente semplificata della formula e come dobbiamo modificarla perché sia applicabile anche a questo caso?

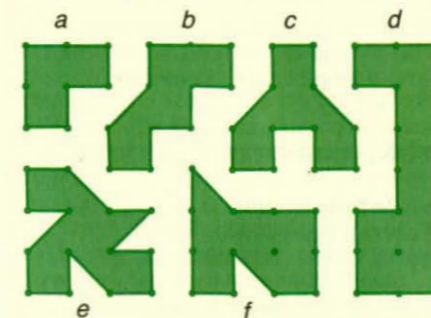
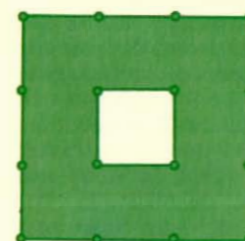
Risposte

La superficie dell'oggetto a forma di *M* dell'illustrazione 6c è davvero 12. I due rami verticali contengono ciascuno quattro quadrati, e se si riempie il dente triangolare superiore facendo scivolare verso l'alto il triangolo inferiore corrispondente si ottengono altri quattro quadrati.

Con le sagome dell'illustrazione 10, si può compilare la seguente tabella:

Forma	*B*	*C*	*B*/2 + *C* - 1	*A*
a	8	0	3	3
b	11	0	4,5	4,5
c	12	0	5	5
d	18	1	9	9
e	14	0	6	6
f	12	1	6	6

Il problema di una versione tridimensionale del teorema di Pick è stato studiato nel 1957 da John Reeve. Reeve osservò che non può esistere una formula che esprima il volume di un poliedro di reticolo solo in funzione del numero dei punti interni o lungo il perimetro, in quanto, per esempio, il tetraedro con vertici (0,0,0), (1,0,0), (0,1,0), (1,1,x) ha esattamente quattro punti lungo il perimetro e zero punti interni, mentre il suo volume varia con il variare di x. Dimostrò allora che, introducendo un secondo reticolo, che nel caso più semplice è quello dei punti di coordinate multiple di 1/2, si può trovare una formula che sia valida per ogni poliedro di reticolo convesso. Questa formula è troppo complicata per poterla riportare in questa sede; il lettore che fosse interessato a conoscerla potrà consultare il testo originale indicato nella bibliografia.

La difficoltà nel calcolare l'area dell'illustrazione 11 deriva dal buco costruito al centro. La dimostrazione del teorema di Pick presuppone che *P* sia diviso in due parti *Q* e *R* con un taglio lungo un unico segmento comune (insieme a connessione semplice). Per modificare la formula bisognerà perciò aggiungere il numero di buchi a $B/2 + C - 1$ (per rendervene conto, notate che il numero di punti blu dell'illustrazione 8 non è più 2 ma $2 + 2h$ se h è il numero di buchi; poi riprendete il ragionamento che abbiamo già fatto). Questa modifica, analizzata nel lavoro di Reeve, è uno dei punti di partenza della sua generalizzazione tridimensionale. Allo stesso Reeve si deve anche l'enunciazione di congetture relative a dimensioni superiori.

10. ***Verificate il teorema di Pick per i poligoni di reticolo.***

11. ***Che cosa c'è che non va in questo caso?***

BIBLIOGRAFIA

PICK G., *Geometrisches zur Zahlenlehre* in «Zeitschrift der Vereines "Lotos"», Praga, 1899.

STEINHAUS H., *Mathematical Snapshots*, Oxford University Press, Oxford, 1950.

REEVE J. E., *On the Volume of Lattice Polyhedra* in «Proceedings of the London Mathematical Society» (terza serie), 7, pp. 378-395, 1957.

COXETER H. S. M., *Introduction to Geometry*, Wiley, New York, 1969.